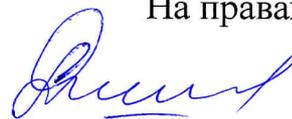


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г.И. НОСОВА»

На правах рукописи



**ХАРЧЕНКО Александр Сергеевич**

**ИНТЕРАКТИВНАЯ СИСТЕМА ЭНЕРГОРЕСУРСΟΣБЕРЕЖЕНИЯ  
ПРИ ВЫПЛАВКЕ ЧУГУНА В ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ, ОСНАЩЕННЫХ  
ЛОТКОВЫМ ЗАГРУЗОЧНЫМ УСТРОЙСТВОМ:  
НАУЧНО ОБОСНОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ**

Специальность 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

Диссертация

на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:

доктор технических наук, доцент  
Сибгатуллин Салават Камирович

Магнитогорск – 2019

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ .....	6
Глава 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ .....	7
1.1 Загрузочные устройства лоткового типа .....	19
1.1.1 Распределение компонентов шихты по окружности и радиусу колошника.....	21
1.1.2 Истечение сыпучих материалов из бункера загрузочного устройства .....	28
1.2 Распределение газа по окружности горна доменной печи.....	33
1.3 Методы оценки неравномерности распределения материалов и газов по окружности печи.....	35
1.4 Искажение рабочего профиля доменной печи .....	38
1.5 Промывка горна доменной печи.....	41
1.6 Горячая прочность и реакционная способность кокса.....	46
1.7 Выводы. Постановка цели и задач исследования .....	49
Глава 2 РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СОВМЕСТНОГО ПОСТУПЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ И ДОБАВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ БУНКЕРА БЗУ ЛОТКОВОГО ТИПА В КОЛОШНИКОВОЕ ПРОСТРАНСТВО ПЕЧЕЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕРАКТИВНОЙ СИСТЕМЫ.....	53
2.1 Методика исследования .....	53
2.1.1 Показатели оптимизации .....	56
2.1.2 Методы проведения экспериментов и обработки результатов.....	59
2.2 Разработка математических зависимостей очередности и равномерности поступления из шихтового бункера железорудных материалов по видам и крупности при различных режимах загрузки .....	69
2.2.1 Фракционный состав агломерата .....	70
2.2.2 Компонентный состав железорудной части шихты.....	80
2.2.2.1 Односкиповая загрузка железорудных материалов в бункер БЗУ .....	80
2.2.2.2 Двухскиповое заполнение шихтового бункера .....	97
2.2.3 Распределение добавочных материалов по ходу выпуска .....	102

2.3 Выявление источников неравномерного распределения железорудных материалов, загружаемых в доменную печь .....	108
2.4 Каноническая связь параметров загрузки и показателя равномерности поступления шихты на колошник доменной печи .....	112
Выводы по главе 2 .....	116
Глава 3 ОЦЕНКА НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ГАЗОВ ПО ОКРУЖНОСТИ ПЕЧИ И ПУТИ ПОНИЖЕНИЯ ЕЕ ВЕЛИЧИНЫ .....	121
3.1 Разработка методики определения коэффициента неравномерности распределения материалов и газов по окружности печи.....	121
3.2 Выявление рациональных режимов загрузки компонентов шихты.....	125
3.2.1 Взаимосвязь коэффициента неравномерности распределения железорудных материалов и газов по окружности колошника с показателями хода процессов работы печи.....	130
3.2.1.1 Газодинамический режим печи.....	134
3.2.1.2 Интенсивность по дутью, газу и шихтовым материалам .....	137
3.2.1.3 Восстановление железа из оксидов.....	139
3.2.1.4 Тепловая работа печи по зонам.....	141
3.2.2 Зависимость между показателями хода процессов и равномерностью поступления коксового орешка из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи .....	143
3.2.3 Уменьшение окружной неравномерности распределения отношения расходов природного газа и дутья по фурмам горна печи .....	155
Выводы по главе 3 .....	168
Глава 4 ВЫЯВЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЗАГРУЗКИ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПЕЧИ.....	172
4.1 Стойкость системы охлаждения в условиях изменения параметров режима загрузки.....	172
4.1.1 Матрицы загрузки.....	172

4.1.2 Доля неофлюсованных окатышей от железорудной части шихты .....	178
4.1.3 Параметры режима загрузки и показатели работы печи при выходе холодильников из рабочего состояния .....	184
4.1.4 Размер колоши и уровень засыпи материалов.....	188
4.2 Разработка режимов загрузки компонентов шихты в колошниковое пространство печи, обеспечивающих устранение искажений её рабочего профиля.....	190
4.2.1. Закономерности распределения материалов и газов по радиусу колошника при различных режимах загрузки компонентов шихты.....	191
4.2.2 Предотвращение риска повышения температуры холодильников шахты применением разработанных режимов загрузки.....	205
4.2.3 Разработка и реализация технологии загрузки в доменную печь материалов, формирующих гарнисаж в горне.....	209
4.2.4 Воздействие на настыль доменных печей ПАО «ММК» разработанным режимом загрузки .....	215
4.3 Особенности технологии доменной плавки в условиях работы печи с настылью в верхней ее части.....	221
Выводы по главе 4 .....	239
Глава 5 РАЗРАБОТКА ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ ПРИ РАБОТЕ ПЕЧИ С ВЕРХНЕЙ ЛИМИТИРУЮЩЕЙ ПО ГАЗОДИНАМИКЕ ЗОНОЙ .....	243
5.1 Исследование физико-механических и физико-химических свойств кокса разных фракций.....	243
5.1.1 Ситовый состав и структурная прочность .....	243
5.1.2 Холодная механическая прочность .....	245
5.1.3 Горячая прочность и реакционная способность.....	246
5.1.4 Технический анализ.....	249
5.2 Уменьшение газодинамической напряженности в верхней части печи рациональной загрузкой коксового орешка в колошниковое пространство...	250

5.3 Горячая прочность железорудных материалов .....	255
5.3.1 Совместный нагрев агломерата и окатышей с коксом в лабораторных условиях .....	255
5.3.2 Прочность по LTD <sub>+6,3</sub> .....	258
5.4 Показатели работы доменных печей ПАО «ММК» .....	259
5.4.1 Влияние горячей прочности агломерата и окатышей на показатели хода процессов .....	259
5.4.2 Разработка рациональных режимов загрузки в зависимости от горячей прочности железорудных материалов .....	269
5.5 Температура железорудного сырья и стабильность ее величины .....	276
Выводы по главе 5 .....	279
Глава 6 ЛОКАЛЬНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПАРАМЕТРАМИ ЗАГРУЗКИ И ДУТЬЯ НА ХОД ПРОЦЕССОВ В ПЕЧИ ПРИ ОПРЕДЕЛЯЮЩЕЙ РОЛИ ГОРНА .....	283
6.1 Разработка и реализация технологии загрузки материалов, обладающих промывочными свойствами, в зону горна печи с наихудшей дренажной способностью .....	283
6.2 Совместная загрузка кокса мелких классов с материалами, улучшающими дренажную способность кокса в горне .....	297
6.3 Анализ эффективности работы доменной печи использованием Марковских цепей .....	301
6.4 Формирование нейросетевой модели для выявления технологических мероприятий, уменьшающих газодинамическую напряженность в нижней части печи .....	310
Выводы по главе 6 .....	328
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	332
Список используемой литературы .....	336
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	395

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность работы**

Металлургия чёрных металлов относится к стратегическим отраслям промышленности, характеризуется большими количествами производимой продукции и, соответственно, потребляемых сырьевых материалов и топлива, в том числе дорогого его вида – кокса, использующего дефицитные виды углей, создающего сложности для экологических условий существования человеческого общества. Мировое производство стали достигло 1,7 млрд т, при доле доменного чугуна в металлошихте 64%, увеличившись за последние 25 лет более чем вдвое [1-4]. По прогнозам схема выплавки металла, включающая производство чугуна в доменных печах, будет актуальной в течение нескольких десятилетий [5-8]. Потребление природных ресурсов примерно в 10 раз выше количества производимого металла. Для выполнения государственной программы о воспроизводстве и использовании природных ресурсов, утвержденной правительством РФ в апреле 2014 года, энергетической стратегии России на период до 2030 года необходимо обеспечивать рациональное их использование и снижение безвозвратных потерь для устойчивого роста экономики, повышения качества жизни населения страны и содействия укрепления ее внешнеэкономических позиций. В связи с этим важным направлением совершенствования металлургии чёрных металлов является энерго- и ресурсосбережение при проведении доменной плавки [9-18], доля которой от общего потребления энергоресурсов составляет более 50% [19].

Современная тенденция развития науки и техники в металлургии чугуна характеризуется развитием, внедрением и широким использованием конкретных приёмов повышения производительности, сокращения потребления кокса, снижения содержания серы в чугуне, удаления настыли от футеровки, формирования защитного гарнисажа на футеровке, уменьшения потерь железа, в том числе на печах, оснащённых бесконусными загрузочными устройствами лоткового типа (БЗУ) [20-23]. В РФ такие устройства имеют доменные печи

ведущих компаний: ПАО «ММК», ПАО «НЛМК», ПАО «Северсталь», ПАО «ЕВРАЗ НТМК», ПАО «ТУЛАЧЕРМЕТ», общим объемом 35150 м<sup>3</sup>, которые производят более 50% чугуна в стране [22, 23].

В соответствии с этим вектор развития приводит к необходимости разработки научно обоснованной системы, позволяющей решать комплексные взаимосвязанные задачи, охватывающие термодинамику и кинетику твёрдофазных и жидкофазных процессов в металлургии чугуна, газодинамику, тепло- и массообмен, коллективное поведение различных элементов в ходе доменной плавки, материало- и энергосбережение.

Диссертационная работа выполнена по тематике хоздоговорных НИР ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и государственного задания Министерства образования и науки РФ.

#### **Степень разработанности темы исследования**

Работа развивает научное направление, начатое в Магнитогорском государственном техническом университете им. Г.И. Носова Заслуженным деятелем науки и техники РФ, доктором технических наук, профессором А.Н. Похвисневым, продолженное профессором А.М. Банных, в последующем развитое доктором технических наук, профессором М.А. Стефановичем.

Материалы диссертации опираются на научные труды многих исследователей научных учреждений, университетов и металлургических предприятий: ФГАОУ НИТУ «МИСиС», ФГБУН «Институт металлургии УрО РАН», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Институт металлургии им. А.А. Байкова РАН, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», ГК МетПром, ОАО «УИМ», ОАО «ВНИИМТ», ФГБОУ ВО НИТУ «ЮУрГУ», ФГБОУ ВО «СибГИУ», ФГБОУ ВО «ЛГТУ», Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, ФГБОУ ВО «Череповецкий государственный университет», ИЧМ НАН Украины, Национальная металлургическая академия Украины, Донецкий национальный технический университет, Днепродзержинский государственный технический университет,

Приазовский государственный технический университет, Криворожский технический университет, ДонНИИчермет, Донбасский горно-металлургический институт, ХМИ им. Ж. Абишева (Казахстан), КарГИУ (Казахстан), ООО ТАЛС-1, ООО «КОРПОРАЦИЯ ЧЕРМЕТ», НПВП ООО «ТОРЕКС», ЗАО «ТОТЭМ», НПО ООО «СПБ ЭК», ассоциация «Русская Сталь», ООО «Северсталь-Проект», ООО «Системосервис», НПП «Киевский институт автоматики», ПАО «ММК», ПАО «НЛМК», ПАО «Северсталь», ПАО «ЕВРАЗ НТМК», ПАО «ГУЛАЧЕРМЕТ и др.

Первостепенными научными проблемами являются:

- развитие теории локального воздействия на лимитирующие зоны и процессы доменной плавки;
- разработка и внедрение усовершенствованных технологических параметров работы доменных печей.

### **Цель работы**

Разработка новых научно обоснованных технологических решений локального воздействия на лимитирующие зоны и процессы доменной плавки при выплавке чугуна в печах, оснащенных лотковым загрузочным устройством, для энергоресурсосбережения в металлургии использованием предложенной интерактивной системы.

### **Основные задачи**

1. Физическим и математическим моделированием, промышленным экспериментированием доказать эффективность локального воздействия на лимитирующие зоны и процессы доменной плавки для энергоресурсосбережения и внедрить полученные результаты, разработав структуру интерактивной системы с приёмами цифровизации.
2. Выявить закономерности совместного поступления компонентов железорудного сырья и добавочных материалов из бункера БЗУ лоткового типа в колошниковое пространство печей с получением математических зависимостей, позволяющих локально размещать их по видам в заданной зоне колошника для эффективного воздействия на определяющие процессы и зоны.

3. Создать методику определения коэффициента, отражающего соответствие технологическому регламенту распределения шихтовых материалов и газов по окружности печей, установить взаимосвязь его величины с показателями хода процессов, выявить способы повышения эффективности их хода в лимитирующих зонах.

4. Рассчитать и экспериментально оценить рациональные параметры загрузки многокомпонентной шихты и использования комбинированного дутья, обеспечивающие необходимое распределение материалов и газов по окружности печей, для энергоресурсосбережения воздействием на лимитирующие процессы и зоны.

5. Адаптировать способы локального целевого размещения материалов по видам (агломерат, окатыши, материалы для промывки или формирования гарнисажа) на заданном удалении от футеровки печей режимами совместного набора компонентов шихты в бункер БЗУ и выпуска из него.

6. Обосновать и исследовать режимы загрузки шихтовых материалов, обеспечивающих сохранение геометрических параметров рабочего профиля доменных печей и повышение срока их службы локальным воздействием на лимитирующие зоны и процессы.

7. Установить и апробировать способы снижения удельного расхода кокса и повышения производительности доменных печей воздействием на параметры загрузки и дутья в условиях работы с верхней лимитирующей зоной по газодинамике и при определяющей роли дренажной способности коксовой насадки в горне.

### **Научная новизна и теоретическая значимость работы**

1. Развита теория локального воздействия на лимитирующие зоны и процессы доменной плавки для энергоресурсосбережения в металлургии чугуна разработкой новых научно обоснованных технологических решений структурированных в интерактивную систему с приёмами цифровизации.

2. Получен комплекс математических зависимостей очередности и равномерности поступления из шихтового бункера железорудных материалов и

добавок по видам и крупности при различных условиях загрузки. Высокие значения коэффициента равномерности поступления компонентов шихты по виду и крупности из бункера БЗУ достигались загрузкой окатышей между слоями агломерата, сформированными в количестве 25-50 и 75-50% от его общего расхода, располагающимися в бункере БЗУ соответственно под и над окатышами. При доле окатышей 30-38% от расхода железорудной части шихты средние величины показателя равномерности по крупности и массе составили соответственно 0,90 и 0,79.

3. Создана теоретически обоснованная методика оценки соответствия технологическому регламенту распределения шихтовых материалов и газов по окружности печей на основе  $X^2$  - статистики, используя квантили  $\chi_k^2$  - статистики для вычисления  $p = p(\chi_k^2)$ , дополняющая теорию доменного процесса.

4. Установлена взаимосвязь коэффициента по  $X^2$  - статистике (по пункту 2), с режимами загрузки, параметрами дутья и показателями работы печей. Уменьшению этого коэффициента применительно к окружному распределению температуры периферийных газов в верхней части шахты с 0,77 до 0,34 соответствовало повышение показателя равномерности поступления компонентов шихты из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи с 0,30 до 0,71. На каждые 10% уменьшения коэффициента приходилось увеличение производительности печей в среднем 0,22%, понижение удельного расхода кокса 0,41%.

5. Дополнены закономерности по формированию слоёв агломерата, окатышей и добавочных материалов в бункере БЗУ и в колошниковом пространстве печей, обеспечивающие повышение производительности, сокращение потребления кокса и требуемое качество металла при повышенной стойкости футеровки для различных условий процесса. Адаптация их к определяющим процессам и зонам позволила:

- уменьшить толщину настыва в шахте печи, что повысило производительность одной из печей на 18,9 % и понизило удельный расход кокса на 5,8 %;

- снизить интервал температур холодильников шахты до рационального уровня 40-50 °С на печах, работавших с повышенными тепловыми нагрузками футеровок шахты, распара, заплечиков.

6. Разработаны теоретически обоснованные энерго- и ресурсосберегающие технологии локальной загрузки промывочных материалов для рациональной очистки зон горна с наилучшей дренажной способностью коксовой насадки. Апробация их на печах, работающих с определяющей ролью дренажа продуктов плавки через слой кокса, показала:

- загрузка соответствующих компонентов шихты (марганцевая, кремнеземо-марганцовистая руды, конвертерный шлак) к осевой зоне целесообразна при работе на коксе с горячей прочностью по CSR менее 35 %;

- при величине CSR более 40% наилучшим результатам соответствует загрузка в зону рудного гребня;

- в условиях работы печи с горячей прочностью кокса в интервале 35-40% предпочтительно загружать равномерно по сечению.

7. Выявлено и научно обосновано прямое и обратное влияние горячей прочности кокса по CSR и его реакционной способности по CRI на газодинамику нижней части печи:

- при расходе природного газа в интервале 85-115 м<sup>3</sup>/т чугуна повышение горячей прочности кокса по CSR на 0,5% абс. в интервале 55,5-57,4% на доменной печи, работающей с определяющей ролью силового взаимодействия потоков шихты в нижней части, уменьшало коэффициент сопротивления шихты на 1,04%;

- в интервале расхода природного газа 115-132 м<sup>3</sup>/т чугуна повышение горячей прочности кокса на ту же величину увеличивало коэффициент сопротивления шихты на 0,87%.

8. Обнаружено новое, научно обоснованное и промышленными экспериментами доказанное направление снижения удельного расхода кокса совместным повышением реакционной способности кокса по CRI и удельного расхода природного газа при выплавке чугуна в доменных печах. Рост показателя CRI от 35 до 40 % обеспечивал увеличение потребления природного газа более чем на 20 м<sup>3</sup>/т чугуна с эквивалентом замены кокса не менее 0,7 кг/м<sup>3</sup> при постоянном содержании кислорода в дутье 27,4 %.

### **Практическая ценность и реализация результатов**

Новые научные результаты были использованы в следующих разработках, внедренных в ПАО «ММК» (акты внедрения и испытаний прилагаются, см. приложения 1-14):

1. Энергоресурсосберегающий режим доменной плавки в условиях верхней лимитирующей зоны по газодинамике, снижающий потребление скипового кокса использованием кокса мелких классов с расходом до 20 кг/т чугуна при коэффициенте замены в интервале 0,68-0,91 кг/кг (2012 г.);

2. Локальное воздействие на лимитирующие зоны и процессы, позволяющие снижать расход кокса увеличением потребления природного газа (2013, 2019 гг.);

3. Разработанные рациональные параметры загрузки многокомпонентной шихты, обеспечивающие повышенную равномерность распределения материалов и газов по окружности печей, для энергоресурсосбережения воздействием на лимитирующие процессы и зоны (2014, 2019 гг.);

4. Локальное размещение агломерата и окатышей относительно футеровки печи при их совместном поступлении в скипах для уменьшения толщины настыва в шахте в среднем на 80 мм, повышения срока службы футеровки снижением интервала температур холодильников шахты до рационального уровня 40-50 °С (2015 г.);

5. Способы уменьшения потерь железа с выносимой пылью и шламом, снижения удельного расхода кокса и повышения производительности доменных

печей воздействием на режим загрузки агломерата и окатышей в колошниковое пространство по их горячей прочности (2015 г.);

6. Способы повышения производительности доменных печей и улучшения качества чугуна локальным целевым размещением материала с повышенным содержанием MgO в слой окатышей, укладывая кластер «магнезиальный материал-окатыши» между слоями агломерата (2017 г.);

7. Технологические решения, обеспечивающие рациональную промывку локальных зон горна с учётом качества кокса по CSR и CRI, сохранение геометрических параметров рабочего профиля доменных печей и повышение их производительности (2018 г.).

Результаты исследований послужили основой для внесения изменений в технологическую инструкцию ПАО «ММК» ТИ 101-Д-22-2014 (изменения прилагаются, см. приложения 15-20).

Результаты диссертации используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлениям подготовки 22.03.02, 22.04.02 – Metallurgy, кадров высшей квалификации по направлению 22.06.01 – Technologies of materials (act of implementation is attached, see appendix 21).

### **Методология и методы исследования**

В работе применяли методы физического и математического моделирования с соблюдением критериев подобия, экспериментальные исследования в лабораторных и промышленных условиях. Энергоресурсосберегающие режимы загрузки доменных печей разработаны моделированием на укрупнённой лабораторной установке БЗУ лоткового типа, имеющей поперечные размеры 1,6x1,5 м, высоту 3,72 м, массу 1,2 т. Она оснащена скиповой системой загрузки. Масштаб моделирования 1 : 5 БЗУ доменных печей полезным объёмом 1370 м<sup>3</sup> ПАО «ММК». Изготовлена по проекту ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». В процессе проведения экспериментов на модели использовали полный двухфакторный план, трехфакторный план Бокса Бенкена. При обработке результатов применили дисперсионный и канонический анализы.

Использовали другие составляющие разработанной интерактивной системы локального воздействия на лимитирующие зоны и процессы доменной плавки: изучение производственной информационной среды, проведение опытных плавов, технологическое сопровождение тестируемых специальных режимов, разработка изменений в технологическую инструкцию с согласованием со специалистами ПАО «ММК», внедрение полученных результатов. Разработанные локальные воздействия имеют 3D - эффект – воздействие местное, а результат отражается в объёме всей печи.

Изменение показателей хода процессов в печах оценивали детерминированным моделированием. При обработке промышленных данных использовали статистический анализ, в том числе нейросетевое моделирование, факторный анализ. Осуществляли прогнозирование эффективности работы доменной печи приложением Марковских цепей.

### **Положения, выносимые на защиту**

На защиту выносятся следующие новые научные результаты:

1. Новые научно обоснованные технологические решения локального воздействия на лимитирующие зоны и процессы доменной плавки для энергоресурсосбережения использованием разработанной интерактивной системы с приёмами цифровизации.

2. Закономерности совместного поступления агломерата, окатышей, добавочных материалов – марганцевой, железной, титаномагнетитовой руд, коксового орешка – из бункера БЗУ в колошниковое пространство с использованием физического моделирования на установке лоткового загрузочного устройства, математических зависимостей для локального размещения их по видам, руководствуясь местом расположения определяющих процессов и зон.

3. Методика оценки соответствия распределения материалов и газов по окружности доменных печей технологическому регламенту на основе теории статистики и новые результаты исследований взаимосвязи его показателя с

показателями хода процессов; выявленные способы повышения эффективности их хода в лимитирующих зонах.

4. Рациональные параметры загрузки многокомпонентной шихты и использования комбинированного дутья, обеспечивающие необходимую равномерность распределения материалов и газов по окружности печей, оснащенной БЗУ лоткового типа для повышения их производительности и снижения удельного расхода кокса.

5. Способы локального целевого размещения материалов по видам и крупности на заданном удалении от футеровки печей режимами совместного набора компонентов шихты в бункер БЗУ и выпуска из него.

6. Технологические решения, обеспечивающие сохранение геометрических параметров рабочего профиля доменных печей и повышение срока их службы локальным воздействием на лимитирующие зоны и процессы.

7. Теоретически обоснованные и экспериментально подтвержденные способы снижения удельного расхода кокса и повышения производительности доменных печей воздействием на режим загрузки железорудного сырья по горячей прочности, кокса по реакционной способности, на дутьё расходом природного газа.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается соответствием основным критериям подобия физической модели БЗУ загрузочному устройству работающей доменной печи, высоким уровнем сходимости результатов моделирования и промышленных испытаний, применением современных измерительных приборов и пакетов прикладных программ, соответствием выявленных закономерностей фундаментальным положениям теории доменного процесса, движения сыпучих сред, газового потока, жидкостей, теплопередачи, массообмена.

#### **Соответствие паспорту специальности**

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов: п. 4 «Термодинамика и кинетика металлургических процессов», п. 5 «Металлургические системы и

коллективное поведение в них различных элементов», п. 6 «Газо- и аэродинамика в металлургических агрегатах», п.10 «Твёрдофазные процессы в получении черных, цветных и редких металлов», п. 17 «Материало- и энергосбережение при получении металлов и сплавов».

### **Апробация работы**

В 2019 г. материалы диссертации доложены на научно-технических советах: ФГАОУ НИТУ «МИСиС» (г. Москва), ФГБУН «Институт металлургии УрО РАН» (г. Екатеринбург), ФГБОУ ВО «СибГИУ» (г. Новокузнецк).

В 2017 г. получена серебряная медаль на Международной промышленной выставке «МЕТАЛЛ-ЭКСПО» за технологию доменной плавки, обеспечивающей в условиях роста доли окатышей сохранение величины тепловых нагрузок на систему охлаждения шахты, распара и заплечиков на рациональном уровне в пределах 40-50 °С.

Основные положения работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: V, VIII и IX Международных конгрессах доменщиков (Украина, Ялта, 2010 г.; Россия, Москва, 2016 г. «Металлургия чугуна – вызовы XXI века»; Нижний Тагил 2018 г. «Металлургия чугуна. Перспективы развития до 2025 г.»); 72-76-й Международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (Магнитогорск, 2012-2018 гг.); 9-й Международной научно-технической конференции «Современная металлургия начала нового тысячелетия» (Липецк, 2012 г.); Межрегиональной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и производство Урала» (Новотроицк, 2012, 2014, 2015 гг.); Международной научно-практической конференции «Теория и практика тепловых процессов в металлургии» (Екатеринбург, 2012 г.); II, III, IV-й всероссийских научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «ТИМ» с международным участием (Екатеринбург, 2013, 2014, 2015 гг.); Международной научно-практической конференции «Создание высокоэффективных производств на предприятиях горно-металлургического комплекса» (Екатеринбург, 2013 г.); Международном форуме промышленных технологий для горного дела,

металлургии, материалобработки и машиностроения «Мир промышленности/Win Russia Ural» (Екатеринбург, 2014 г.); Международной научно-практической конференции «Творческое наследие В.Е. Грум - Гржимайло», посвященная 150-летию со дня рождения В.Е. Грум – Гржимайло (Екатеринбург, 2014 г.); 5-й Международной научно-технической конференции «Металлургические процессы и оборудование» (Донецк. Украина, 2013 г.); IV, V-й Международных научно-практических конференциях «Инновации в металловедении и металлургии» (Екатеринбург, 2014, 2015 гг.); Научно-практической конференции с международным участием и элементами школы молодых ученых «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР» (Екатеринбург, 2015 г.); XII-й всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные проблемы горно-металлургического комплекса» (Старый Оскол, 2015 г.); Международной научно-практической конференции «Материаловедение. Машиностроение. Энергетика» (Екатеринбург, 2015 г.); XIX-й Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество» (Новокузнецк, 2015 г.); Научно-технической конференции «Современное состояние и перспективы развития металлургии железа», посвященной 100-летию со дня рождения А.М. Бигеева (Магнитогорск, 2017 г.); научно-практической конференции с международным участием и элементами школы молодых ученых «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР: ФЕРРОСПЛАВЫ» (Екатеринбург, 2018 г.).

**Личный вклад автора заключается:** в развитии теории локального воздействия на лимитирующие зоны и процессы доменной плавки для энергоресурсосбережения в металлургии разработкой новых научно обоснованных технологических решений структурированных в интерактивную систему, позволяющей решать комплексные взаимосвязанные задачи, охватывающие термодинамику и кинетику твёрдофазных и жидкофазных

процессов в металлургии чугуна, газодинамику, тепло- и массообмен, коллективное поведение различных элементов в ходе доменной плавки, материало- и энергосбережение при работе металлургического предприятия; разработке методики физического моделирования и комплекса показателей, отражающих математическими зависимостями движение сырьевых материалов из бункера БЗУ и распределение их по окружности и сечению доменной печи; создании научных основ целевого формирования слоёв агломерата, окатышей и добавочных материалов в бункере БЗУ и в колошниковом пространстве печей в зависимости от решаемой задачи по воздействию на лимитирующие зоны и процессы; разработке конкретных приёмов повышения производительности, сокращения потребления кокса, снижения содержания серы в чугуне, удаления настывов от футеровки, формирования защитного гарнисажа на футеровке, уменьшения потерь железа воздействием на лимитирующие зоны и процессы; определении режимов локальной загрузки промывочных материалов (марганцевая, кремнеземо-марганцовистая руды, конвертерный шлак), обеспечивающих рациональную очистку зон горна с наихудшей дренажной способностью коксовой насадки, для энерго- и ресурсосбережения при работе доменной печи; выявлении рационального уровня корректируемых технологических параметров в зависимости от их некорректируемых видов, состояния лимитирующих зон и процессов.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 78 научных трудов, из них 32 публикации в рецензируемых журналах (10 статей – в журналах, индексируемых в международных базах Web of Science, Scopus и 22 статьи – в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ), 1 монография, 1 патент РФ на изобретение, 5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 6-ти глав, заключения, списка использованной литературы из 517 наименований и приложений (акты внедрения результатов исследований). Она изложена на 434 странице машинописного текста, содержит 69 рисунков и 140 таблиц.

## Глава 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

### 1.1 Загрузочные устройства лоткового типа

К основным агрегатам доменной печи относят загрузочные устройства (ЗУ). Они определяют эффективность работы печи через управление распределением компонентов шихты в колошниковом пространстве. В последнее время в мировой практике получили широкое распространение загрузочные устройства лоткового типа. Их устанавливают на новые или реконструированные печи [24-29]. Массовое оборудование доменных печей данными загрузочными устройствами началось с начала 70-80-х годов прошлого столетия. Их устанавливали в странах Европы, Китае, Соединенных Штатах Америки, Индии и др. [30, 31]. Например, в Японии к 1979 году устройство лоткового типа было установлено на одной печи, к 1982 году данным устройством оборудовали 7 доменных печей, а к 1988 году их количество возросло до 15, что составило 42 % от всех работающих печей в Японии [32].

В настоящее время более половины чугуна, выплавляемого в мире, производится на печах, оборудованных лотковым ЗУ [33]. В том числе в РФ на сегодняшний день лотковым загрузочным устройством оснащены 14 доменных печей ведущих металлургических предприятий России – ПАО «ММК», ПАО «НЛМК», ПАО «Северсталь», ПАО «ЕВРАЗ НТМК», ПАО «ТУЛАЧЕРМЕТ» общим объемом 35150 м<sup>3</sup>, которые производят более 50% чугуна в России [22, 23].

Одним из основных производителей лотковых загрузочных устройств является фирма «Пауль Вюрт», которая разработала и запатентовала лотковое загрузочное устройство в 1969 году. Их разработки основаны на развитии технических решений изобретателей СССР 1891-1959 годов [34]. С 1972 года фирмой «Пауль Вюрт» было установлено около 700 БЗУ. Из них сейчас в мире работает около 350 аппаратов (на некоторых печах старые лотковые аппараты заменяли новыми лотковыми устройствами, некоторые печи вывели из

эксплуатации). Более 100 загрузочных устройств являются однокотловыми [35], в том числе 5 из них установлены на доменных печах ПАО «ММК» [36]. Загрузочные устройства лоткового типа обладают рядом преимуществ по сравнению с конусными загрузочными устройствами (КЗУ) [37-48]:

- управляемое распределение компонентов шихты по радиусу колошника, в том числе точечная или секторная загрузка материалов;
- высокая надежность и износостойкость узлов и агрегатов;
- меньший объем работ при ежегодном обслуживании ЗУ;
- возможность работы при более высоком давлении колошникового газа (до 3 ати).

Согласно работам [49, 50] данные преимущества бесконусного загрузочного устройства перед конусным обеспечивают эффективное распределение материалов по радиусу, что увеличивает восстановительную способность газа в печи [51]. Несмотря на достоинства лотковых загрузочных устройств, технико-экономические показатели работы печей, оснащенных лотковым ЗУ, уступают аналогичным печам по характеристикам, оснащенным конусными загрузочными устройствами. Это видно из сравнения двух печей ПАО «ММК» одинакового объема – 1370 м<sup>3</sup> [52, 53], различных доменных печей предприятий «Северсталь», «Запорожсталь» и «Криворожсталь», работающих в одинаковых шихтовых и дутьевых условиях [54-55].

В результате сформировано мнение, что использование лотковых загрузочных устройств на доменных печах большого объема оправдано по конструктивным соображениям, но не по причине их преимуществ по сравнению с конусными загрузочными устройствами [54-56]. А на доменных печах среднего и малого объема использование устройств лоткового типа не целесообразно [54]. Однако правильно отмечено в работе [30]: «само по себе загрузочное устройство лоткового типа не обеспечит заданного распределения шихтовых материалов в колошниковом пространстве печи». Оно является инструментом управления, которое необходимо осваивать [41-47]. Для

эффективного управления лотковым загрузочным устройством целесообразна установка и использование современных систем шихтоподготовки [48].

### **1.1.1 Распределение компонентов шихты по окружности и радиусу колошника**

Одной из причин низких технико-экономических показателей работы печей, оснащенных лотковым ЗУ по сравнению с печами, работающими на конусных ЗУ, является неравномерность распределения материалов по окружности колошника в условиях высокой эффективности распределения компонентов шихты по радиусу печи. Для интенсивного протекания его с низким удельным расходом кокса необходимо обеспечивать равномерное окружное и оптимальное по радиусу колошника распределение материалов [57-63]. Неравномерность распределения материалов вызвана разными причинами [64-66]. Одной из них является многокомпонентность загружаемой шихты [36, 67, 68]. Например, в ПАО «ММК» используют два вида железорудного сырья – агломерат и окатыши. Дополнительно загружают различные добавочные материалы – для промывки горна (марганцевая, железная руды, конвертерный шлак), для формирования гарнисажа (титаномагнетитовые руды, окатыши Качканарского ГОК) и для снижения удельного расхода скипового кокса (коксый орешек или фракция) [69, 70]. Все шихтовые материалы обладают различными физико-химическими и физико-механическими свойствами – горячая и холодная прочность, температура потери газопроницаемости слоя и др. [71-74].

Расположение новых порций материалов на поверхности засыпи зависит от ряда факторов, которые определяются параметрами загрузки: угол наклона [75-77], скорость и направление вращения лотка [78], длина лотка [77, 79, 80], траектории движения материалов от лотка до поверхности ранее сформировавшегося слоя [81, 82], характеристики материала [83, 84], угол открытия шихтового затвора [75, 85], количества и последовательности

поступления компонентов из шихтового бункера по наименованиям и крупности [86-92], поведения материалов на поверхности слоя шихты после загрузки [93], в том числе их сегрегация [94, 95] и перколяция [96], количество бункеров и их расположение [97]. Разработаны различные математические модели, выявляющие рациональные параметры загрузки различными методами [98-102]. Однако некоторые параметры загрузки невозможно или нецелесообразно изменять для повышения равномерности распределения материалов по окружности печи. Величина уровня засыпи определяется исходя из условий работы печи. Например, ее изменение может являться результатом ухудшения или улучшения газодинамики в верхней ее части, поэтому увеличивать или уменьшать ее с целью повышения равномерности распределения материалов в колошниковом пространстве печи чаще всего нецелесообразно. Скорость вращения лотка и угол открытия шихтового затвора обеспечивают совпадение мест поступления начала и конца выгрузки материалов. Угол наклона лотка определяет месторасположение материала в поперечном сечении колошникового пространства печи. Траектория движения материала от носка лотка до поверхности засыпи и перемещение его по ранее сформированной поверхности зависит от характеристик материала – крупности, формы, насыпной плотности и др. В связи с этим данными параметрами варьировать в целях улучшения равномерности распределения компонентов шихты по окружности колошника невозможно. Однако их необходимо учитывать при оптимизации параметра, характеризующего равномерность распределения компонентов шихты по окружности колошника.

Известны способы загрузки доменных печей, обеспечивающие устранение неравномерного распределения шихтовых материалов по окружности печи, перекоса профиля поверхности засыпи [103-105], однако согласно им равномерное распределение компонентов шихты можно обеспечить при отдельной загрузке железорудных материалов в бункер БЗУ или устранить сам перекося профиля засыпи. При совместной загрузке двух и более компонентов шихты причина образования перекося не устраняется, и

материалы продолжают поступать в колошниковое пространство печи различные по виду и крупности.

В работах [97, 106] устранение неравномерного распределения шихтовых материалов обеспечивалось использованием режимов загрузки с чередованием точек начала выгрузки порций материала или последовательное смещение точек выгрузки каждой последующей порции по окружности. Это позволило им обеспечить уменьшение окружной неравномерности распределения объемов шихты от 1,5 до 1 % и рудных нагрузок от 3,5 до 2 %. Если учесть, что матрица загрузки на одной доменной печи может включать более 20 различных комбинаций выгрузки железорудного сырья и кокса по радиусу, отличающихся различным набором станций углового положения лотка, то для обеспечения равномерности распределения необходимо точку начала выгрузки сдвигать не для каждой последующей порции материалов, а через цикл, что достаточно затруднительно.

Также предлагается управление окружным распределением путем изменения раскрытия шихтового затвора [107], что согласно нашим исследованиям [85] является достаточно эффективным способом, обеспечивающим повышение равномерности распределения компонентов шихты по ходу выпуска материалов из бункера лоткового загрузочного устройства в колошниковое пространство печи. Однако в условиях, когда оптимальное время выгрузки подобрано с учетом характеристик материалов, их массы и количества станций, с которых осуществляется их выгрузка, изменение угла открытия шихтового затвора проблематично. В таких условиях последовательность набора компонентов сырья в шихтовый бункер бесконусного загрузочного устройства относится к определяющим факторам, регулирование которым позволит устранить причину, обеспечивающую неравномерность распределения компонентов шихты по окружности колошника.

Предложено несколько способов определения рационального размещения материалов в шихтовом бункере для обеспечения равномерного поступления

компонентов шихты из бункера ЗУ на лоток. Авторы работы [68] получили детерминированную математическую модель. Результаты расчета [68] позволили установить рациональное размещение известняка в бункере лоткового ЗУ при совместной загрузке с агломератом основностью 2,2 и окатышами основностью 0,3 для обеспечения радиальной однородности шихты по основности. При содержании железорудных материалов в сырье соответственно 40 и 60 % известняк целесообразно размещать в нижней части бункера БЗУ, после чего окатыши, затем агломерат, либо первым в бункере располагать агломерат, следом известняк, после чего окатыши. Однако наряду с известняком в состав шихты многих предприятий входят и другие добавочные материалы – коксовый орешек, фракция, материалы, формирующее гарнисаж или обеспечивающие промывку горна. Кроме того, необходимо обеспечивать равномерное распределение не только добавочных материалов, но и железорудной части шихты – агломерат и окатыши. В связи с этим в работе [108] предлагается метод построения математической модели формирования порции в шихтовом бункере и истечения ее в колошниковое пространство печи, проведение экспериментов с использованием импульсных электромагнитных датчиков, которые возбуждают импульсные вихревые токи в железорудном сырье и измеряют вторичное электромагнитное поле. Однако в настоящее время в литературе не представлены закономерности истечения разнородной по крупности и виду материалов шихты.

Таким образом, для устранения неравномерности распределения шихтовых материалов по окружности колошника необходимо совершенствовать конструкцию лоткового загрузочного устройства и разрабатывать режимы и алгоритмы управления существующими загрузочными устройствами [109]. Решение этой задачи возможно выявлением закономерностей поступления компонентов шихты из бункера лоткового ЗУ в колошниковое пространство печи физическим, математическим моделированием и проведением экспериментов на доменных печах.

Не менее важным для условий повышения технико-экономических показателей плавки и сохранения целостности футеровки является рациональное распределение компонентов шихты по радиусу колошника [110-113]. При этом роль радиального распределения материалов и газов возрастает с увеличением диаметра колошника. Распределение компонентов шихты по радиусу колошника должно быть оптимально неравномерным [114, 115]. Оптимальное распределение рудных нагрузок по радиусу печи характеризуется следующими значениями: на периферии – 0,8-1; в зоне рудного гребня – 4,5-7 и в центральной части печи – 0-2. При этом зона рудного гребня должна находиться на расстоянии 0,1-0,25 радиуса колошника от стенки. То есть для устойчивого хода печи необходимо установить рациональное сочетание размеров и газопроницаемости осевой и периферийной зон [97, 116]. Кроме того, при выгрузке необходимо обеспечивать выгрузку окатышей в количестве до 85 % от их массы в кольцо шириной 0,5 радиуса колошника в середине зоны. К периферии и осевой зоне целесообразно загружать 5-10 % окатышей от их массы [117]. Однако в условиях совместного выпуска окатышей и агломерата из бункера лоткового загрузочного устройства в колошниковое пространство печи для обеспечения заданного распределения компонентов шихты по радиусу необходимо учитывать закономерности выгрузки смеси из бункера для различных условий загрузки. Кроме того, в кольце шириной 0,5 радиуса колошника в середине зоны окатыши в количестве 85 % от их массы необходимо распределить равномерно по радиусу [118], поскольку агломерат и окатыши обладают различными физико-механическими и физико-химическими свойствами [71, 119], в результате чего от распределения железорудных материалов по радиусу зависит положение и вид зоны вязко-пластичного состояния, газопроницаемость столба шихты, процессы восстановления и теплообмена [120-138].

Для выявления рационального распределения материалов в доменной печи в заданных условиях работы доменной печи, оборудованной лотковым загрузочным устройством, разработаны математические модели [139-146], в

том числе включающие различные критерии оптимизации [147]. Например, предложен аналитический критерий режима загрузки доменной печи [148-150], учитывающий качество шихтовых материалов и степень использования газа в печи [151]:

$$K_R^3 = \Pi_{\text{Ц.Т.}} \frac{l_{\text{отд}}^{\text{ось}}}{l_{\text{отд}}^{\text{пер}}} \cdot \frac{Q_{\text{к.г.}}}{F_K} \cdot \frac{1}{U_{\text{сх}}} \cdot \frac{P_{\text{к.г.}}}{\Delta P / \xi}, \quad (1.1)$$

$$\Pi_{\text{Ц.Т.}} = (l_{\text{Ц.Т.}} / r_k)(R_{\text{ср}} / R_{\text{вз}}), \quad (1.2)$$

$$l_{\text{Ц.Т.}} = \sum_i (R_i \cdot l_i) / \sum_i R_i, \quad (1.3)$$

$$R_{\text{вз}} = \sum_i (R_i \cdot l_i) / \sum_i l_i, \quad (1.4)$$

где  $l_{\text{Ц.Т.}}$  и  $r_k$  – расстояние от оси до точки положения центра тяжести рудной нагрузки и радиус колошника, м;

$R_i$  – рудная нагрузка в  $i$ -й кольцевой зоне колошника, ед.;

$l_i$  – расстояние от оси печи до середины  $i$ -й кольцевой зоны, м;

$R_{\text{ср}}$ ,  $R_{\text{вз}}$  – средняя по печи и средневзвешенная (расположенная в центре тяжести) рудная нагрузка, ед.;

$l_{\text{отд}}^{\text{ось}} / l_{\text{отд}}^{\text{пер}}$  – отношение величин отдушин у оси и на периферии колошника, ед.;

$Q_{\text{к.г.}}$ ,  $P_{\text{к.г.}}$  – выход и давление колошникового газа, м<sup>3</sup>/мин и ати;

$\Delta P / \xi$  – отношение перепада давления газа в печи к удельному сопротивлению слоя рудных материалов и кокса, ати и доли ед.;

$F_K$  – площадь колошника, м<sup>2</sup>;

$U_{\text{сх}}$  – скорость схода материалов в печи, м<sup>3</sup>/мин.

По результатам расчетов уменьшение данного критерия от  $215,3 \cdot 10^{-3}$  до  $2,8 \cdot 10^{-3}$  соответствовало повышению производительности печи объемом 5500 м<sup>3</sup> от 7000 до 12000 т/сут [148].

Имеются разработки по совместной загрузке кокса и железорудной части шихты [152-155] по разным вариантам расположения компонентов шихты в бункере: в нижней части бункера кокс (К), затем кокс в смеси с агломератом (К+А), после чего кокс (К); А, А+К, А; К, К+О, К; О, О+К, К, К, О, А и др. [154]. Смешивание кокса крупностью 40-80 мм с агломератом, содержащим 5-40 % фракции 5-0 мм, уменьшало газодинамическое сопротивление шихты в доменной печи объемом 1033 м<sup>3</sup> на 12-25 % по сравнению с полученным при послойной укладке тех же материалов [152]. Технология со смешиванием части железорудного сырья и кокса в условиях НЛМК обеспечило уменьшение удельного расхода кокса на 1,3 % при повышении производительности печи № 6 на 0,9 % [155].

Наиболее эффективное воздействие на уменьшение газодинамической напряженности в верхней части печи оказывает совместная загрузка смеси железорудного сырья и кокса мелких фракций [156-185]. В виду одинаковой крупности агломерата, окатышей и коксового орешка повышается порозность шихты и улучшается газопроницаемость верхней зоны доменной печи [186-191]. Однако в условиях выгрузки смеси из железорудного сырья и коксового орешка необходимо обеспечивать равномерное их распределение по окружности колошника при локальном размещении кокса мелких фракций в колошниковом пространстве по его сечению. Важность обеспечения равномерного распределения кокса мелких фракций заключается в том, что расположение коксового орешка вблизи с агломератом или окатышами не только улучшает газопроницаемость верхних слоев шихты, но и изменяет скорость и степень восстановления железорудных материалов [193, 194]. Концентрация орешка в определенном секторе колошника затрудняет его расходование на реакции прямого восстановления, что приводит к снижению фильтрующей способности кокса в горне печи [173, 184]. В результате нерациональный режим загрузки кокса мелких классов при длительном их использовании может приводить к существенному снижению дренажной

способности коксовой насадки и ухудшению технико-экономических показателей плавки.

Таким образом, в настоящее время определены рациональные режимы загрузки шихтовых материалов по радиусу колошника, обеспечивающие рациональное распределение рудных нагрузок, потери напора газа для работы печи с высокой производительностью и низким удельным расходом кокса. Однако нет понимания, какие компоненты железорудной части шихты поступают в колошниковое пространство печи в заданный промежуток времени в условиях выгрузки из бункера лоткового ЗУ смеси, включающей два и более компонента. Мало работ, направленных на устранение лимитирующей зоны или процесса в печах с лотковым ЗУ локальным воздействием на них параметрами загрузки. Нет систематизированного подхода по локальной загрузке компонентов шихты в заданное пространство колошника по окружности и радиусу в условиях выгрузки из бункера многокомпонентной смеси в зависимости от условий плавки. В связи с этим актуальным является развитие теории локального воздействия на лимитирующие зоны и процессы доменной плавки, разработка и внедрение технологических параметров доменных печей, оснащенных бесконусным загрузочным устройством лоткового типа для снижения удельного расхода кокса, повышения производительности печей и срока их службы.

### **1.1.2 Истечение сыпучих материалов из бункера загрузочного устройства**

Очередность поступления компонентов шихты по виду и крупности из бункера лоткового ЗУ в колошниковое пространство печи зависит от физико-механических явлений, протекающих во время истечения сыпучей среды из бункера через отверстие. Закономерности истечения сыпучей среды из бункеров различной формы описаны во многих работах [195-206]. Шихтовые материалы, загружаемые в доменную печь, можно отнести к идеальной

сыпучей среде. То есть сыпучая среда не имеет сцепление между частицами и сыпучее тело не воспринимает растягивающих усилий [207].

Различают характер истечения сыпучей среды на нормальное, сплошное и гидравлическое. Нормальным истечением сыпучей среды через отверстие считают при условии, когда частицы сыпучей среды находятся в движении в зоне столба материалов, расположенного над выпускным отверстием бункера (рисунок 1.1, а). Материал, располагающийся около стенок бункера, находится в неподвижном состоянии до того момента, пока воронка, образовавшаяся на поверхности сыпучей среды, не достигнет нижней части бункера [208,209].

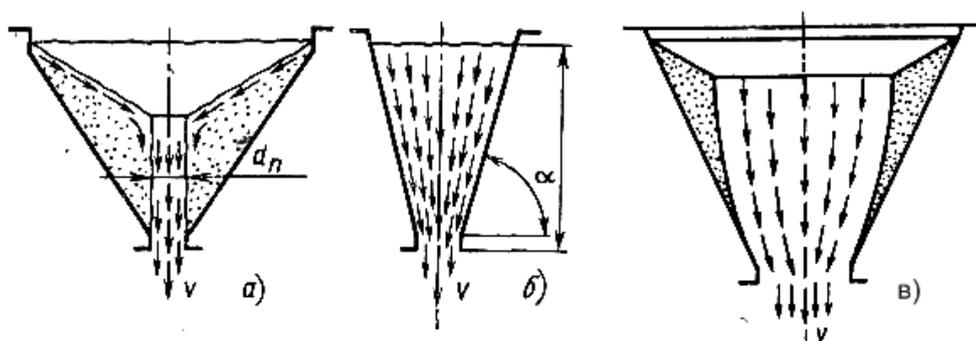


Рисунок 1.1 – Схемы истечения сыпучего тела из отверстий [208]:

а – нормальное истечение материалов; б – сплошное истечение;

в – гидравлическое истечение

Величину диаметра канала  $d_{\text{п}}$ , по которому перемещаются частицы сыпучей среды можно вычислить по формуле:

$$d_{\text{п}} = \frac{\tau_0(2 + \sin \alpha)}{\gamma}, \quad (1.5)$$

где  $\tau_0$  – начальное сопротивление сдвигу;

$\gamma$  – насыпная плотность;

$\alpha$  – угол наклона стенки [208].

При величине угла наклона стенок бункера, равного  $70-80^\circ$ , истечение сыпучей среды через отверстие будет иметь сплошной характер (рисунок 1.1,

б). В условиях, когда сыпучая среда сильно аэрирована, характер ее истечения через отверстие будет гидравлическим [209]. Угол наклона стенок бункеров лоткового ЗУ, установленных на современных доменных печах, составляет порядка  $50^{\circ}$ , что обеспечивает нормальный характер истечения шихтовых материалов из него в колошниковое пространство.

Авторы работы [210] установили, что при нормальном истечении сыпучей среды при выпуске ее через отверстие образуется пять зон (рисунок 1.2).

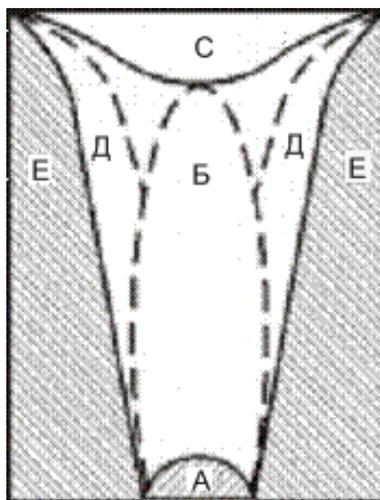


Рисунок 1.2 – Зоны истечения сыпучего груза из емкости [210]  
(пояснения в тексте)

Зона «А» на рисунке 1.2, или согласно терминологии [211] – эллипсоид выпуска, находится непосредственно перед выпускным отверстием. В ней сыпучая среда находится в свободном падении. Согласно работам [212, 213] эта зона имеет объем, ограниченный поверхностью эллипсоида вращения. Зона «Б» на рисунке 1.2 представляет эллипсоид разрыхления. Его объем превышает объем зоны «А» в 15 раз (рисунок 1.3, а), [211]. Эта зона характеризуется вертикальным движением сыпучей среды. При этом наиболее высокие скорости достигаются у оси эллипсоида разрыхления (рисунок 1.3, в). Зона потока «Б» формируется поступлением в нее частиц сыпучей среды из зон «С» и «Д» на рисунке 1.2 преимущественно из верхних слоев. В условиях

увеличения количества выпускаемого материала увеличиваются объемы эллипсоидов выпуска и разрыхления (рисунок 1.3, б). При этом всегда сохраняется равенство объема и высоты воронки и эллипсоида выпуска (рисунок 1.3, г). Зона «Е» на рисунке 1.2» образует застойную зону, материал из которой в зону потока «Б» поступает последним.

Коротич В.И. делит процесс выпуска сыпучей среды из бункера через отверстие на три фазы. Фаза № 1 начинается с момента открытия выпускного отверстия и заканчивается в период, когда зона разрыхления достигает своего максимума (рисунок 1.3). При этом бункер освобождает материал, который располагается в зоне эллипсоида разрыхления. В фазе № 2 зона эллипсоида разрыхления имеет постоянные размеры. В нее материалы поступают из вышележащих слоев сыпучей среды. Фаза № 3 характеризуется уменьшением размеров эллипсоида разрыхления. В ней образуется воронка выпуска, которая имеет угол наклона, близкий к естественному углу откоса [214].

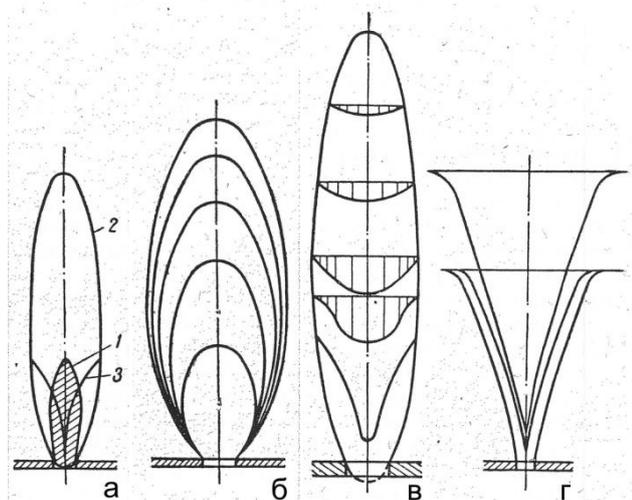


Рисунок 1.3 – Движение сыпучего тела через отверстие:

а – соотношение размеров: эллипсоида выпуска (1) и эллипсоида разрыхления (2), воронки выпуска (3); б – увеличение сечения и высоты эллипсоида выпуска при увеличении количества выпущенного материала; в – скорости схода частиц в эллипсоиде разрыхления; г – воронки выпуска [212]

На очередность поступления компонентов шихты из бункера лоткового ЗУ влияет несимметричное размещение материалов относительно выпускного отверстия. Согласно работе [215] скорость опускания слоя шихты со стороны гребня превышала скорость опускания материала со стороны впадины в 1,5-2 раза.

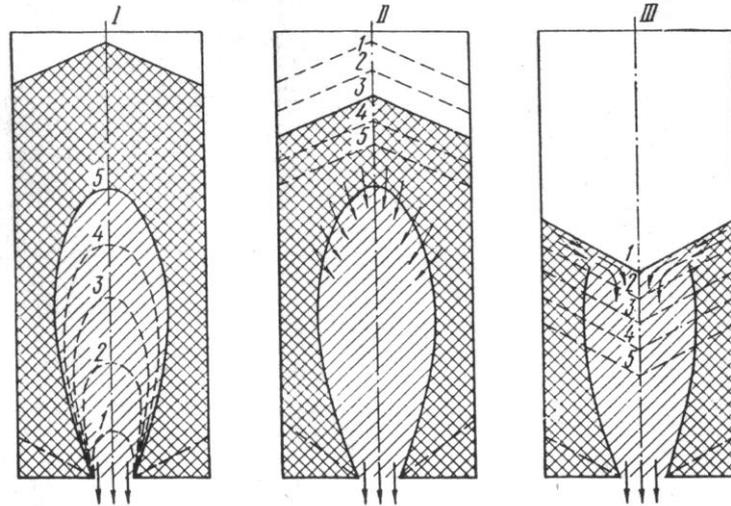


Рисунок 1.4 – Схема движения сыпучего материала в бункере при его опорожнении

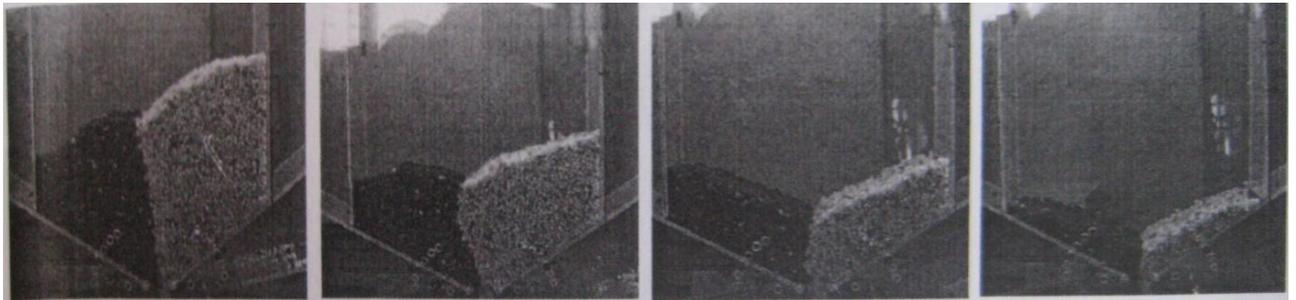


Рисунок 1.5 – Характерные стадии выпуска сыпучего тела из экспериментальной установки [215]

Таким образом, характер истечения сыпучей среды через отверстие свидетельствует о высокой роли формирования порции шихтовых материалов в бункере лоткового ЗУ на равномерность поступления ее компонентов в колошниковое пространство печи. В связи с этим в настоящее время является актуальным разработка закономерностей совместного истечения агломерата,

окатышей, добавочных материалов – марганцевой, железной, титаномагнетитовой руды, коксового орешка – из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи для различных условий загрузки.

## **1.2 Распределение газа по окружности горна доменной печи**

Для достижения наиболее высоких технико-экономических показателей работы доменной печи наряду с равномерным распределением железорудных материалов по окружности колошника целесообразно обеспечивать равномерное распределение газов по окружности горна [216-218].

На современных доменных печах расход дутья на каждую фурму не регулируется [219]. В результате не обеспечивается равномерное распределение дутья по фурмам и, следовательно, количество и состав фурменного газа по окружности горна, теоретическая температура горения и протяженность фурменного очага. Неравномерность распределения дутья по фурмам вызвана различными причинами [220]. В том числе она зависит от диаметра кольцевого воздухопровода [221], количества фурм и сопротивления материалов над ними [218, 222], подвода тракта горячего дутья к кольцевому воздухопроводу [223-226], искажения профиля печи разгаром и настылями [227, 228].

Для повышения равномерности распределения дутья по фурмам было предложено подводить дутье к кольцевому воздухопроводу с двух сторон, изменять диаметры фурм [229]. В лабораторных условиях было показано улучшение равномерности распределения дутья при тангенциальном подводе прямого воздухопровода к кольцевому воздухопроводу [230]. Внедрение данных решений в производство требует определенных затрат, связанных с изменением конструкции подвода прямого воздухопровода к кольцевому.

Наиболее эффективным в данном случае выглядит перераспределение природного газа по фурмам. Согласно расчетам [231] перераспределение

природного газа по фурмам позволит повысить удельный расход природного газа от 120 до 150 м<sup>3</sup>/т чугуна, что обеспечит экономию удельного расхода кокса более 20 кг/т чугуна. Перераспределение природного газа по фурмам обеспечит выравнивание теоретической температуры газа, что согласно работе [232] приведет к более глубокому проникновению газов в центр печи, что положительно скажется на доменной плавке.

Для решения проблемы равномерности распределения газового потока по окружности и радиусу горна печи разрабатываются алгоритмы управления параметрами комбинированного дутья [233-238]. Перераспределение природного газа по фурмам доменной печи в направлении увеличения его расхода в фурмах с повышенным расходом дутья и уменьшения расхода газа в фурмах с пониженным расходом дутья сопровождалось повышением содержания СО<sub>2</sub> на 0,1-0,2 % и уменьшения Н<sub>2</sub> на 0,1-0,2 % в колошниковом газе, увеличивалось содержание кремния в чугуне в течение 2-4 ч после проведения коррекции, что позволяло увеличить рудную нагрузку от 4,18 до 4,24 [239]. При неизменном удельном расходе природного газа 124 м<sup>3</sup>/т чугуна (в единицу времени его расход был увеличен на 10 %) удельный расход кокса сократился с 521 до 502,5 кг/т чугуна [240]. Корректировка расхода природного газа по фурмам сопровождалась выравниванием распределения водорода по сечению колошника (рисунок 1.6).

Таким образом, для эффективной работы доменной печи необходимо согласованное управление окружным распределением материалов в верхней части печи и газов в нижней. В связи с этим необходимо выявить рациональные параметры загрузки многокомпонентной шихты и подачи дутья, обеспечивающие необходимую равномерность распределения материалов и газов по окружности печи, оснащенной БЗУ лоткового типа, и уменьшение удельного расхода кокса и увеличение производительности печи.

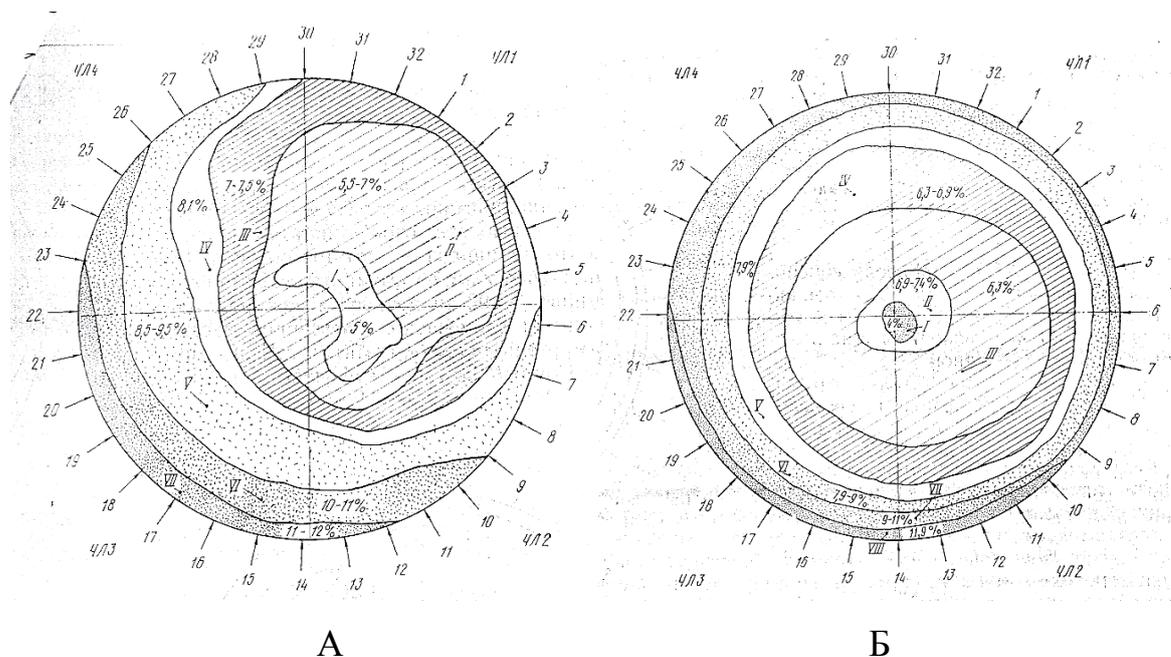


Рисунок 1.6 – Распределение водорода по сечению колошника при равномерном (А) и неравномерном (Б) распределении природного газа по фурмам [239]

### 1.3 Методы оценки неравномерности распределения материалов и газов по окружности печи

В производственных условиях ровность хода печи по окружности оценивают разностью между максимальной и минимальной температурами. В этом случае используется информация о тепловом состоянии печи в двух секторах. При этом количество термопар, по которым можно оперативно оценивать распределение материалов и газов по окружности, на некоторых печах ПАО «ММК» достигает 8, а на других заводах и 16 [97, 241]. Равномерность распределения материалов в зонах со средними температурами также имеет существенное влияние на технико-экономические показатели плавки. В связи с этим в работе [242] был введен коэффициент неравномерности  $\Phi$ , учитывающий среднюю величину измеряемого признака  $B$ ,

$$\Phi = (B_{\max} - B_{\min}) / B_{\text{ср}}. \quad (1.6)$$

Данную формулу применяли для выявления окружной неравномерности распределения материалов на колошнике печи по рудной нагрузке, массе и объему [243]. Однако на практике затруднительно оперативно определять массу или объем материала в секторах по окружности колошника. Применение ее для температур периферийных газов в разные периоды измерения (А и Б) показало, что при равенстве коэффициента  $\Phi$ , равного 0,551 (таблица 1.1), величина среднеквадратического отклонения  $\sigma$  отличалась на 14,2%. Наиболее равномерное распределение температуры периферийного газа было в периоде «Б» по сравнению с периодом «А», на что указывает значение  $\hat{\sigma}$ , а также и температурный градиент. В связи с этим в оценке неравномерности распределения материалов и газов по окружности колошника целесообразнее использовать среднеквадратическое отклонение, чем линейный коэффициент  $\Phi$ .

Таблица 1.1 – Окружное распределение температур периферийного газа на доменной печи ПАО «ММК»

Номер периода	Температура периферийного газа под газоотводами, °С								$\Phi$	$\hat{\sigma}$
	1	2	3	4	5	6	7	8		
А	155	168	153	90	126	106	104	109	0,551	28,8
Б	145	162	150	87	127	119	110	111	0,551	24,7

В различных отраслях производства для оценки неравномерности распределения наиболее широко применяют коэффициент вариации [244]:

$$V = \frac{1}{\bar{n}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (n_i - \bar{n})^2}{N-1}}, \quad (1.7)$$

где  $n_i$  – значение случайной величины в  $i$ -м опыте;

$\bar{n}$  – среднее арифметическое содержание компонента в пробах;

$N$  – число проб.

Коэффициент вариации подобного вида был предложен К. Пирсоном в

1895 году. Применительно для доменного производства его использовали для выявления неравномерности поступления компонентов железорудной части шихты из бункера бесконусного загрузочного устройства лоткового типа в колошниковое пространство печи [245-247], а также для оценки окружного распределения материалов в доменной печи по показаниям периферийных термопар [248]. Коэффициент вариации является безразмерной величиной и не зависит от среднего результата. Однако он имеет непостоянные границы, что затрудняет использование его в качестве меры неравномерности распределения исследуемых материалов. Кроме всего, коэффициент вариации  $V$  не дает ответа, какое его значение следует признать как не отвечающее равномерности и с какой надежностью  $p = 1 - \alpha$  подтверждается этот вывод.

В работе [249] предложен метод оценки равномерности распределения компонентов смеси, алгоритм которого основан на кластеризации  $K$  средних [250-252], который реализован для оценки равномерности распределения смеси в двухкомпонентных средах на основе прикладного пакета MATLAB. Выполнение процедуры кластеризации требует отбора проб смеси и распределение ее равномерным слоем на ровной поверхности для последующего фотографирования или сканирования, чтобы затем провести компьютерную обработку изображения, представив его в виде области (матрицы)  $S_{i,j}$   $i = \overline{1, N}$ ,  $j = \overline{1, M}$ , где  $M$  и  $N$  – заданное число строк и столбцов соответственно. После компьютерного распознавания компонент смеси на основе анализа точек (пикселей), характеризующих световые (цветовые) свойства компонент, вычисляют коэффициент равномерности распределения для каждой компоненты смеси по формуле, в основу которой положена вариация пикселей относительно общей средней для исследуемой компоненты.

При всех достоинствах данного метода использование его в условиях доменного производства не представляется возможным из-за трудоемкости отбора и подготовки проб смеси для получения световой (цветовой) матрицы изображения, где на фотографиях часто присутствуют различные артефакты, такие

как тени, размытые границы, значительные изменения оттенков смесей и т.д.

В работе [253] равномерность распределения легирующего элемента оценивали по средневзвешенной дисперсии относительных интенсивностей и сравнения ее с табличными значениями  $F$ -распределения. Метод был апробирован и рекомендован для твердых образцов металла, содержащих легирующий элемент. В методе использовался анализ спектральных линий образцов металла, а затем определялась средневзвешенная дисперсия относительных интенсивностей, и на основе полученной  $F$ -статистики Фишера оценивали неравномерность распределения легирующего элемента в образце металла. Очевидно, что метод, рекомендованный для специально подготовленных образцов легированного металла, недоступен для сыпучих материалов и газов, присутствующих в доменной печи.

В последнее время на современных доменных печах устанавливаются системы диагностики распределения газа по окружности и радиусу колошника, например система «Спиротерм», установленная на печи № 9 «Криворожстали» и № 5 «Северстали» [254], которые визуализируют распределение газового потока по сечению колошника. Такие системы считывают информацию либо с собственных термопар, которые устанавливаются над уровнем засыпи, либо с существующих на печах приборов [255]. Установка и поддержание работоспособности дополнительных термопар сопровождается значительными затратами, кроме того, система визуализации также не отвечает на вопрос о равномерности распределения шихты.

Таким образом, возникла необходимость разработки методики определения коэффициента равномерности распределения шихтовых материалов по окружности доменной печи.

#### **1.4 Искажение рабочего профиля доменной печи**

В процессе эксплуатации доменных печей искажается ее рабочий профиль – истирается кладка и холодильники или образуются настыли [256-

264]. Образование настывей является результатом циркуляции цинка и щелочных соединений в доменной печи [265-269]. В условиях ПАО «ММК» содержание Zn в агломерате достигает 0,041 % [270]. При доле агломерата в железорудной части шихты 70 % такое содержание цинка приводит к периодическому образованию настывей в шахте доменных печей. Разработаны способы удаления цинка из доменных печей. Разработаны способы удаления цинковых настывей в доменных печах [271] методом сухой выдувки. Метод заключается в опускании уровня засыпи доменной печи до 7-9 м, с повышением температуры колошниковога газа до 500-600 °С. После достижения заданной температуры колошниковога газа постепенно загружают корректирующие подачи материала с высокой порозностью, например, использованием в составе шихты фракционированного или конвертерного шлака, способствующей увеличению газопроницаемости верхнего столба шихты и препятствующей перегреву колошника. Однако, данный способ удаления цинковых настывей не пригоден для доменных печей, оснащенных бесконусными загрузочными устройствами, которые не позволяют развивать необходимые температуры. В таком случае полезным будет «цинковая» промывка [272], которая включает мероприятия по периодическому выводу цинкосодеждающих компонентов шихты, улучшению гранулометрического состава сырья и максимально возможному форсированию плавки. Однако в условиях, когда доля цинкосодеждающих шихт достигает 60-70%, это достаточно проблематично.

Уменьшение доли агломерата от 70 до 50% при повышении доли неофлюсованных окатышей от 30-50% на длительный срок приводит к ускоренному истиранию кладки шахты, распара и заплечиков и преждевременному выходу из строя холодильников.

На доменных печах ПАО «ММК» в 1972 году переход от офлюсованных доломитом окатышей к неофлюсованным привел к массовому выходу из строя холодильников шахты, распара и моратора [273-274]. В этот же период еще быстрее изнашивались огнеупорная кладка и холодильники доменной печи № 4

ОАО «Носта» (ОХМК) при использовании в составе шихты неофлюсованных окатышей Лебединского ГОКа [275].

В современных условиях работы доменных печей ПАО «ММК» при повышении доли окатышей наблюдаются такие же проблемы, как и 40 лет назад. Например, увеличение доли окатышей на доменной печи № 2 ПАО «ММК» до 60% обеспечило ускоренное удаление цинковой настыви, располагавшейся в верхней части шахты [276], но и привело к преждевременному выходу из строя холодильников моратора.

Исследователи указывают разные причины ускоренного износа кладки печи и преждевременного выхода из строя холодильников [273-275, 277, 278]. К ним относятся:

- растянутая зона шлакообразования;
- повышенная напряженность работы печи;
- повышенное боковое давление шихты на футеровку;
- отсутствие в технологии доменной плавки составляющих, направленных на формирование гарнисажа.

Формирование гарнисажа может обеспечиваться использованием дополнительных материалов [279, 280], воздействием на свойства имеющихся компонентов шихты [275, 281] и воздействием на ход процессов вблизи футеровки. В компонентах шихты имеет существенное значение гранулометрический состав, холодная и горячая прочность агломерата [282, 283], а в процессах – ход восстановления железа из оксидов по высоте печи [284].

В направлении понижения величины тепловых нагрузок системы охлаждения шахты, распара и заплечиков при использовании неофлюсованных окатышей может действовать работа печи на повышенном перепаде давления газов за счет увеличения давления горячего дутья [285-287], установление рационального режима загрузки шихтовых материалов в печь.

Опускание шихты в печи под действием силы тяжести, преодолевая силы, действующие в противоположном направлении (подъёмная сила газового потока, силы трения и др.), предопределяет необходимость создания условий

для уменьшения силы трения шихтовых материалов о футеровку печи, снижения вероятности формирования настывли в шахте, улучшения режима формирования гарнисажа. Повышение газопроницаемости периферийной зоны для этого увеличением доли кокса в ней, кроме снижения потерь газа в области противоточного движения твёрдых материалов и газов, обеспечивает создание периферийного коксового окна в зоне когезии, повышенный прогрев периферии горна печи, улучшенные условия для продвижения продуктов плавки к лёткам.

Таким образом, выявление оптимального распределения шихтовых материалов на колошнике доменной печи может решить проблему образования настывлей цинкосодержащих шихт и ускоренного износа кладки и системы охлаждения печи.

### 1.5 Промывка горна доменной печи

Дренажная способность коксовой насадки в горне доменной печи зависит от различных факторов [288-293], в том числе от химического состава шлака [294-303], природы (генезиса) его элементов [304], которые определяют его вязкость  $J_{ш}$ , что в совокупности с выходом шлака в единицу времени  $Ш_{вр}$  характеризует силу  $F_{ш}$ , которая необходима для его движения:

$$F_{ш} = J_{ш} \cdot Ш_{вр}. \quad (1.8)$$

При этом вязкость отражает силу внутреннего трения в шлаковом расплаве. В виду многокомпонентности шихты, используемой в большинстве доменных печей России, в горне образуются локальные зоны с различным химическим составом шлака, что отрицательно сказывается на его вязкости и, следовательно, на фильтрации через слой кокса.

Для улучшения работы горна и нижней части доменной печи в целом разрабатывают шихты с заданным химическим составом [305-308], определяют рациональные параметры комбинированного дутья [309], обеспечивающим

оптимальное расположение и форму зоны вязко-пластичного состояния железорудных материалов [310-312]. Исследуют шлаковый режим [313-317].

На дренаж жидких продуктов плавки через слой кокса влияют его свойства [318], в том числе горячая прочность, которая определяет количество мелкой фракции кокса в горне печи [319]. Уменьшение горячей прочности кокса или нерациональное использование в составе шихты кокса мелких фракций в виде коксового орешка или коксовой фракции отрицательно сказывается на проницаемости через нее чугуна и шлака, что сопровождается снижением технико-экономических показателей работы печи [172, 320-323]. В совокупности с различным химическим составом шлака по радиусу и окружности печи образуются локальные зоны, в которых затруднено движение чугуна и шлака через слой кокса к леткам.

Существуют различные способы промывки горна доменной печи [323-344], предлагающие обеспечивать заданный состав шлака с максимальной жидкотекучестью, путем загрузки различных промывочных материалов [345], в том числе марганцевых, железных руд или железомарганцевых руд [346-350], шлаков доменного и сталеплавильного производств [351-356], промывочного высокозакаисного или марганцовистого агломерата [357-360] различных брикетов [361-370], железокальциевых флюсов [305]. Также применяют технологии промывки горна изменением расхода природного газа [370, 372].

Механизм действия промывочных материалов по предупреждению загромождения горна неплавкими и тугоплавкими массами зависит от вида промывочного материала.

Марганцевая и железная руды промывают горн от спели и мелочи кокса по реакциям:



Тем самым углерод этих неплавких составляющих уносится из печи газами, а зола мелочи кокса растворяется в шлаке.

Добавление  $MnO$  в шлак доменной печи снижает температуру ликвидуса и вязкость шлака [373]. Согласно рисунку 1.7 [374] повышение содержания  $MnO$  от 0 до 2% особенно эффективно снижает вязкость первичного шлака, образывающегося при температурах 1300 °С [375, 376].

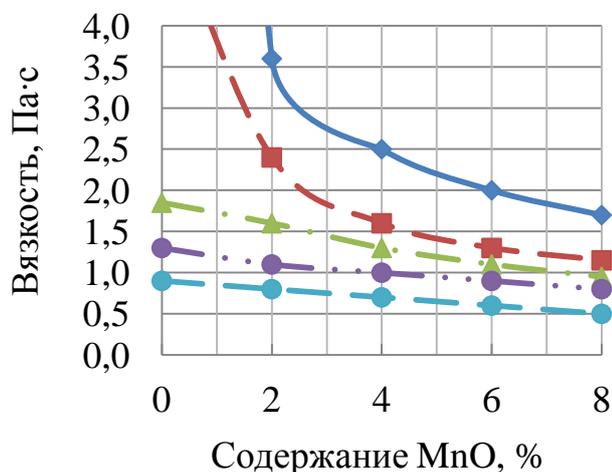


Рисунок 1.7 – Изменение вязкости полусинтетических шлаков от содержания  $MnO$  при температуре 1250 (◆), 1300 (■), 1350 (▲), 1400 (◆), 1500 °С (●)

Лабораторными исследованиями [377] установлено, что фильтруемость шлака через коксовую насадку при увеличении содержания  $MnO$  в шлаке основностью 1,4 ед. от 0,3 до 0,6 % зависела от вида используемого марганецсодержащего материала. Наименьшее увеличение фильтруемости шлака через коксовую насадку, сформированную из кокса ООО «Мечел-кокс», равное 1-2 % абс., имел шлак с добавлением в аглошихту оксида марганца в виде марганцевой руды. Использование марганцевого известняка повышало фильтруемость шлака более чем на 10 %.

Материалы с повышенным содержанием  $SiO_2$ , например кварцит, который, с одной стороны, является флюсом (кислотным), а с другой – промывочным материалом, или комплексные руды – кремнеземо-марганцовистые руды, железные руды – обеспечивают промывку от высокоосновных составляющих вида  $2CaO \cdot SiO_2$  (ларнит) и  $3CaO \cdot 2SiO_2$  (ранкинит) ввиду протекания реакций:



Происходит снижение температуры плавления силикатов кальция, ассимиляция их шлаком с последующим выходом из печи при выпуске чугуна. Наличие  $\text{MnO}$  и  $\text{FeO}$  обеспечивает промывку от мелочи кокса и спели по реакциям (1.6) и (1.10).

Фракционированный конвертерный и доменный шлаки, нагреваясь и расплавляясь, переносят тепло из зоны распара-запечников в горн. Дополнительный прогрев горна увеличивает скорость реакций (1.9)–(1.12) и уменьшает вязкость шлака. От этого возрастает механический вынос неплавких и тугоплавких масс с выпускаемым через лётки шлаком.

Кроме того, конвертерные шлаки имеют высокое содержание  $\text{MgO}$ , что улучшает жидкотекучесть, фильтруемость шлака [377-388] и повышает температуру начала размягчения [389]. При температуре  $1450^\circ\text{C}$ , основности 1 увеличение содержания  $\text{MgO}$  от 8 до 14% при сохранении основности шлака и температуры снижает величину вязкости от 0,51 до 0,37 Па·с [374]. Из сравнения натуральных шлаков Кузнецкого, Магнитогорского, Череповецкого и Орско-Халиловского металлургических предприятий [389] следует, что в интервале температур  $1400\text{--}1450^\circ\text{C}$  повышение содержания  $\text{MgO}$  от 6,9 до 11,7% уменьшает вязкость шлака в соответствии с рисунком 1.8. Повышенное содержание  $\text{MgO}$  в шлаке делает его «коротким». Различие в результатах объясняется влиянием природы (генезиса) магнийсодержащих добавок. Из исследуемых в работе [377] природных материалов – дунита, сидерита и доломита, которые широко используются в металлургии черных металлов [378-385], наиболее высокое увеличение фильтруемости шлака основностью 1,25 ед. через кокс НТМК обеспечивало повышение содержания  $\text{MgO}$  в шлаке от 6 до 9% за счет добавления в состав шихты дунита. Фильтруемость повысилась более чем на 20%. При использовании сидерита в качестве магнийсодержащей

добавки повышение фильтруемости составило более 10%. Использование доломита не обеспечило повышение фильтруемости шлака.

Несмотря на известные химические составы шихты, обеспечивающие наиболее высокую жидкотекучесть продуктов плавки для условий нормальной работы печи, необходимо обеспечивать равномерное распределение всех компонентов шихты для достижения равномерности состава шлака по окружности и радиусу горна доменной печи. При ухудшении дренажной способности горна печи необходимо выявлять зоны горна с наихудшей фильтрующей способностью коксовой насадки, определять причины ухудшения фильтрации жидких продуктов плавки и обеспечивать локальную загрузку заданного промывочного материала.

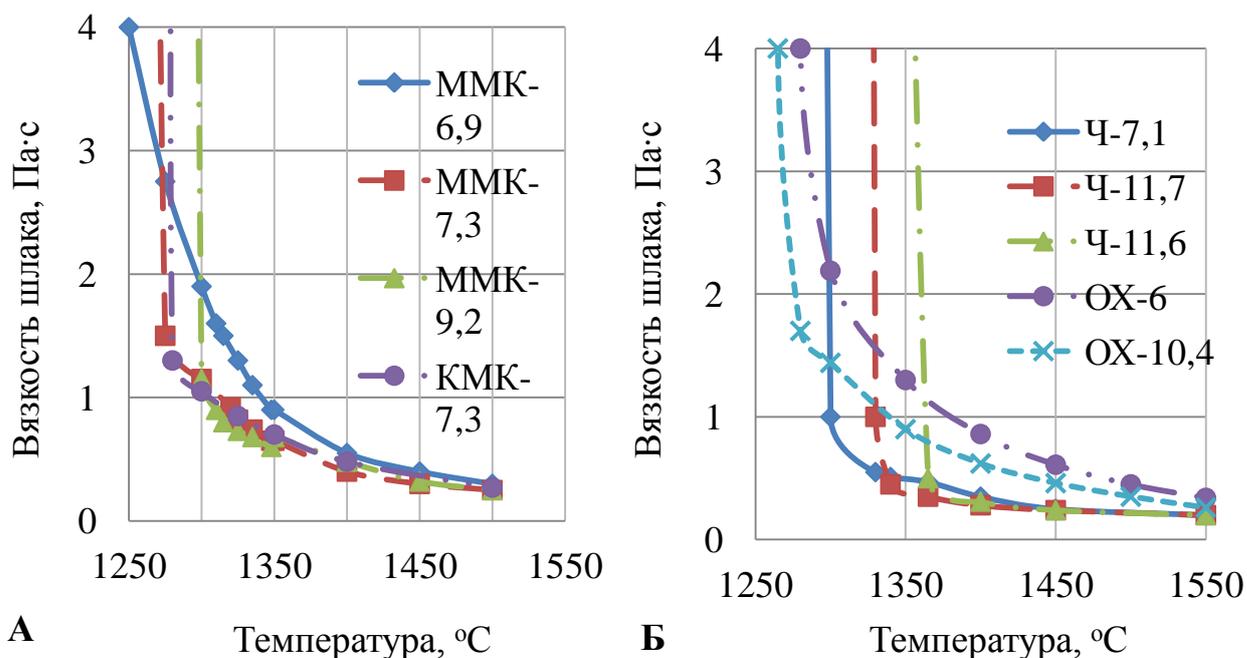


Рисунок 1.8 – Изменение вязкости натуральных шлаков Кузнецкого (КМК), Магнитогорского (ММК), Череповецкого (Ч) и Орско-Халиловского (ОХ) предприятий (цифры рядом с аббревиатурами характеризуют содержание MgO в шлаке)

Имеются работы, отражающие локальную промывку горна печи в периферийной зоне регулированием расхода природного газа [372] и промежуточной зоне [365, 391]. При этом в работе [391] рекомендуют

ограничить попадание промывочных материалов к периферии и к осевой зоне печи. Это уменьшит агрессивное воздействие на футеровку печи при использовании следующих промывочных материалов: флюорита или фторсодержащих материалов, шлаков силикомарганца и ферромарганца, сварочного шлака, нефлюсованных высококремнистых окатышей, высокозакисного агломерата и др. Загрузка промывочных материалов вида: офлюсованный железистый, конвертерный шлак, кусковая железная руда в осевую зону может приводить к образованию конгломератов из шлако-металлического расплава, что отрицательно будет сказываться на дренажной способности коксовой насадки.

Однако дренажная способность коксовой насадки может ухудшаться не только в промежуточной зоне горна, а также в центральной и периферийной зонах [392]. В связи с этим актуальным на сегодняшний день является разработка интерактивной системы локального воздействия промывочных материалов на лимитирующие зоны и процессы доменной плавки, включающая анализ причины ухудшения дренажа горна, выявления локальной зоны, лимитирующей процесс фильтрации чугуна и шлака через слой кокса, и собственно саму загрузку промывочного материала в колошниковое пространство печи в заданную зону колошникового пространства печи.

## **1.6 Горячая прочность и реакционная способность кокса**

Работа горна доменной печи в большей степени определяется прочностными свойствами кокса в «горячем» состоянии по CSR и реакционной способностью CRI [393-406]. Поскольку CSR и CRI в большинстве случаев зависят друг от друга, то для устранения искажения результатов из-за двойного учета зависимых параметров предлагают учитывать только один из показателей, либо CSR, либо CRI. Авторы работы [408] считают, что показатель горячей прочности CSR является более комплексным по сравнению с показателем CRI, поскольку учитывает фактор наложения на

газифицированный кокс механической разрушающей нагрузки. Авторы работы [409] считают наоборот. Показатель CRI наиболее хорошо исследован и к методике его определения нет замечаний.

При оценке показателя реакционной способности кокса необходимо учитывать тот факт, что она зависит от наличия щелочных оксидов. Увеличение их доли повышает величину CRI [410]. Горячая прочность кокса зависит от содержания в коксе золы и ее химического состава [411]:

$$CSR=68,84-7,43 \cdot B_{ash}, \% \quad (1.13)$$

где  $B_{ash} = A^d(K_2O + Na_2O + MgO + CaO + Fe_2O_3)/100$ .

Увеличение горячей прочности кокса способствует уменьшению образования мелочи в горне и, следовательно, улучшению условий дренажа продуктов плавки. По различным исследованиям влияние горячей прочности кокса на технико-экономические показатели работы доменных печей различно. Для условий НЛМК рост горячей прочности кокса на 1% в интервале 53-65% обеспечивает снижение удельного расхода кокса на 1,1% и повышению производительности на 1,2% [412, 413]. Работа на коксе с высокой горячей прочностью позволила достигнуть на доменной печи НЛМК «Россиянка» суточную производительность 13300 т (98,7 т/м<sup>2</sup>·сут) [414].

На НТМК рост горячей прочности кокса на 1% в интервале 49,3-55,5% в исследуемые периоды обеспечивал снижение удельного расхода кокса на 0,59% [415]. Расчеты на математических моделях [413] также показывают близкую к этому значению величину, равную 0,41% по расходу кокса и 0,52% по производительности. Статистическим анализом базы данных в работе [416] установлено, что повышение горячей прочности кокса на каждый 1% в интервале от 50 до 60% уменьшало удельный расход кокса на 0,3 и повышало производительность печи на 1%. Абсолютная величина горячей прочности, равная 64,9%, была достигнута на заводе НТМК в 2007 году впервые в отечественной металлургии [417].

Для условий ММК влияние горячей прочности кокса на удельный расход кокса по различным исследованиям составляет 0,3-0,6%.

По исследованиям на доменных печах «Арселор Митал» в Кривом Роге получили прямое и обратное влияние реакционной способности кокса на технико-экономические показатели работы печи. В октябре по сравнению с апрелем 2006 года уменьшение реакционной способности кокса по CRI на 1% в интервале 32,3-40,3% при увеличении горячей прочности кокса от 36,1 до 52,3% сопровождалось уменьшением удельного расхода кокса на 0,83% при повышении производительности печи на 0,72% [409, 418]. В феврале по сравнению с октябрем 2006 года увеличение реакционной способности кокса по CRI на 1% в интервале 32,2-38,9% при уменьшении горячей прочности кокса от 52,8 до 38,9% сопровождалось уменьшением удельного расхода кокса на 2,5% при повышении производительности печи на 2,2% [409, 418, 419]. Положительное влияние повышения реакционной способности кокса в интервале 25-45% описано работе [420]. Расчетом показано, что работа на коксе с высокой реакционной способностью кокса приводит к снижению расхода кокса и повышению расхода дутья. Прямое и обратное влияние реакционной способности кокса можно объяснить лимитированием процесса дренажа продуктов плавки через слой кокса. В условиях работы печи с низкой дренажной способностью кокса в горне печи повышение горячей прочности кокса в условиях уменьшения его реакционной способности оказывало положительное влияние на технико-экономические показатели работы печи. При работе доменной печи в условиях, когда дренаж чугуна и шлака через слой кокса не лимитирует процесс получения чугуна, сильное влияние на процессы теплообмена оказывала реакционная способность кокса в горне печи.

Из этого следует, что нецелесообразно при анализе использовать только одну из величин CSR или CRI. Необходимо учитывать оба показателя. Однако при этом необходимо учитывать особенности технологии получения чугуна в доменной печи. Если в качестве топливной добавки используется ПУТ наряду с природным газом, то необходимо стремиться к высокой величине горячей

прочности кокса на уровне 60% и выше. Это можно обеспечить рациональным формированием угольной шихты, обеспечивающей показатель «отражение витринита» в ней на уровне 1,3-1,4% [413, 422-424]. Работа доменных печей различных заводов Украины и Европы на коксе с высокой горячей прочностью в условиях вдувания ПУТ обеспечивала высокие технико-экономические показатели плавки [425, 426]. В условиях использования природного газа в качестве топливной добавки целесообразно выявлять рациональные величины реакционной способности кокса, обеспечивающие наряду с высокой горячей прочностью наиболее высокие технико-экономические показатели работы печи. В связи с этим целесообразно стремиться разработать технологию получения кокса, обеспечивающую одновременное повышение горячей прочности и реакционной способности кокса.

### **1.7 Выводы. Постановка цели и задач исследования**

1. Современная тенденция развития науки и техники в металлургии чугуна характеризуется развитием, внедрением и широким использованием конкретных приёмов повышения производительности, сокращения потребления кокса, снижения содержания серы в чугуне, удаления настыли от футеровки, формирования защитного гарнисажа на футеровке, уменьшения потерь железа, в том числе на печах, оснащённых бесконусными загрузочными устройствами лоткового типа (БЗУ). В РФ такие устройства имеют доменные печи ведущих компаний: ПАО «ММК», ПАО «НЛМК», ПАО «Северсталь», ПАО «ЕВРАЗ НТМК», ПАО «ТУЛАЧЕРМЕТ», общим объемом 35150 м<sup>3</sup>, которые производят более 50% чугуна в стране.

2. На доменных печах большинства металлургических предприятий РФ используют многокомпонентную шихту, которая включает агломерат, окатыши различных производителей и добавочные материалы – топливные добавки в виде коксового орешка или фракции, промывочные материалы, например, марганцевая или железная руды, материалы, формирующие гарнисаж. В виду

этого возникают проблемы с обеспечением равномерного их распределения по окружности и рационального по радиусу колошника. Особенно это проявляется на доменных печах с бесконусным загрузочным устройством лоткового типа (БЗУ). Это отрицательно сказывается на ходе процессов, в частности приводит к различию начала и конца размягчения железорудного сырья по секторам, что ведёт к нарушениям в движении потоков шихты и газа. Изменяется скорость и степень восстановления железорудных материалов. Нарушается равномерность химического состава чугуна и шлака по окружности горна. Все это отрицательно сказывается на технико-экономических показателях плавки.

3. Для устранения нарушения равномерности распределения материалов и газов проведено много исследований путем математического, физического моделирования, промышленных экспериментов. При этом решались локальные задачи для частных условий. В связи с чем нет комплекса математических зависимостей очередности и равномерности поступления из шихтового бункера железорудных материалов и добавок по видам и крупности при различных условиях загрузки. Нет согласованности в управлении окружным распределением материалов в верхней части печи и газов в нижней.

4. Анализ библиографических источников показал, что для оценки неравномерности обычно использовались различные коэффициенты, учитывающие изменчивость материальных и энергетических ресурсов в процессе производства продукции, наибольшее распространение получил коэффициент вариации, введенный К. Пирсоном еще в 1895 году. Однако он имеет непостоянные границы, что затрудняет использование его в качестве меры неравномерности распределения исследуемых материалов. Кроме всего, коэффициент вариации  $V$  не дает ответа, какое его значение следует признать как не отвечающее равномерности и с какой надежностью  $p = 1 - \alpha$  подтверждается этот вывод.

5. Одной из проблем в настоящее время, с которой сталкиваются металлургические предприятия РФ, – сохранение геометрических параметров рабочего профиля доменных печей. В процессе их эксплуатации происходит

искажение профиля. Локально образуются настывы, частично происходит разрушение кладки, требующее формирования гарнисажа. Изменение профиля в результате этого приводит к ухудшению хода доменной плавки. Образование настывы ухудшает распределение материалов и газов, что отрицательно сказывается на процессах восстановления и теплообмена. В результате повышается удельный расход кокса и снижается производительность печи. Разгар кладки увеличивает риск прогара холодильников, что впоследствии сопровождается менее интенсивной работой печи и созданием аварийной ситуации. Это также обеспечивает снижение ее производительности. Существующие методы удаления настывы на доменных печах, оснащенных лотковым загрузочным устройством, не приемлемы в виду конструктивных особенностей загрузочных устройств, в связи с чем требуется разработка соответствующих технологий плавки, обеспечивающих сохранение геометрических параметров рабочего профиля доменной печи.

6. Для эффективной работы печи требуется постоянная оценка состояния условий ее работы и локальное воздействие параметрами загрузки и дутья на лимитирующие зоны и процессы в печах с лотковым загрузочным устройством, в том числе при работе печи с верхней лимитирующей зоной по газодинамике и при определяющей роли дренажной способности коксовой насадки в горне.

**Целью настоящей работы является** разработка новых научно обоснованных технологических решений локального воздействия на лимитирующие зоны и процессы доменной плавки при выплавке чугуна в печах, оснащенных лотковым загрузочным устройством, для энергоресурсосбережения в металлургии использованием предложенной интерактивной системы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Физическим и математическим моделированием, промышленным экспериментированием доказать эффективность локального воздействия на лимитирующие зоны и процессы доменной плавки для энергоресурсосбережения и

внедрить полученные результаты, разработав структуру интерактивной системы с приёмами цифровизации.

2. Выявить закономерности совместного поступления компонентов железорудного сырья и добавочных материалов из бункера БЗУ лоткового типа в колошниковое пространство печей с получением математических зависимостей, позволяющих локально размещать их по видам в заданной зоне колошника для эффективного воздействия на определяющие процессы и зоны.

3. Создать методику определения коэффициента, отражающего соответствие технологическому регламенту распределения шихтовых материалов и газов по окружности печей, установить взаимосвязь его величины с показателями хода процессов, выявить способы повышения эффективности их хода в лимитирующих зонах.

4. Рассчитать и экспериментально оценить рациональные параметры загрузки многокомпонентной шихты и использования комбинированного дутья, обеспечивающие необходимое распределение материалов и газов по окружности печей, для энергоресурсосбережения воздействием на лимитирующие процессы и зоны.

5. Адаптировать способы локального целевого размещения материалов по видам (агломерат, окатыши, материалы для промывки или формирования гарнисажа) на заданном удалении от футеровки печей режимами совместного набора компонентов шихты в бункер БЗУ и выпуска из него.

6. Обосновать и исследовать режимы загрузки шихтовых материалов, обеспечивающих сохранение геометрических параметров рабочего профиля доменных печей и повышение срока их службы локальным воздействием на лимитирующие зоны и процессы.

7. Установить и апробировать способы снижения удельного расхода кокса и повышения производительности доменных печей воздействием на параметры загрузки и дутья в условиях работы с верхней лимитирующей зоной по газодинамике и при определяющей роли дренажной способности коксовой насадки в горне.

## **Глава 2 РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СОВМЕСТНОГО ПОСТУПЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ И ДОБАВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ БУНКЕРА БЗУ ЛОТКОВОГО ТИПА В КОЛОШНИКОВОЕ ПРОСТРАНСТВО ПЕЧЕЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕРАКТИВНОЙ СИСТЕМЫ**

### **2.1 Методика исследования**

Для выявления рациональных режимов загрузки компонентов шихты в колошниковое пространство печи в зависимости от условий хода доменного процесса, обеспечивающих наиболее высокую равномерность поступления компонентов шихты по массе или крупности, осуществили физическое моделирование на лабораторной установке компактного бесконусного загрузочного устройства лоткового типа, изготовленной в масштабе 1:5 по отношению к линейным размерам БЗУ доменных печей № 2, 4 и 6 ПАО «ММК» (рисунки 2.1, 2.2).

Проведением более 200 различных экспериментов рассмотрено действие следующих факторов на распределение материалов по окружности и сечению доменной печи:

- Расходные характеристики компонентов шихты:
  - содержание окатышей в интервале 10-90% от железорудной части шихты;
  - расход коксового орешка в интервале 0-6% от массы материалов, загружаемых в бункер БЗУ;
  - расход промывочных материалов (марганцевая и железная руды) в интервале 0-13%.
- Содержание фракции -5 и -10 мм в агломерате в интервале 1-18%.
- Последовательность набора компонентов шихты в бункер БЗУ.
- Степень заполнения бункера БЗУ.

- Угол открытия шихтового затвора в интервале  $35-60^\circ$  для выпуска материалов из шихтового бункера БЗУ.



Рисунок 2.1 – Физическая модель однотокового компактного загрузочного устройства лоткового типа



Рисунок 2.2 – Скиповая система загрузки шихтовых материалов в физическую модель бесконусного загрузочного устройства

В ходе эксперимента было соблюдено равенство критерия Ньютона для реальной печи  $Ne_{\text{ДП}}$  и модели  $Ne_{\text{М}}$ :

$$Ne = \frac{F \cdot \tau_{\text{П}}^2}{M_{\text{П}} \cdot L}, \quad (2.1)$$

где  $M_{\text{П}}$  – масса поступающей шихты из бункера БЗУ, кг;

$L$  – расстояние, на которое перемещаются материалы, м;

$\tau_{\text{П}}$  – время, за которое происходит перемещение на расстояние  $L$ , с;

$F$  – сила тяжести материала, Н.

В процессе проведения экспериментов в бункер БЗУ загружали агломерат различных фракций. Исследования включали различные варианты проведения опытов. В том числе изменяли содержание фракции 1-5 мм в интервале от 1 до 18%, класса -10 и +10 мм от 10 до 90 из 100%. Загрузку в бункер БЗУ осуществляли путем размещения фракции менее 10 мм под фракцией +10 мм над ней, в среднем ее слое и наоборот. Исследовали компонентный состав железорудной части шихты. В бункер загружали смесь из агломерата и окатышей. Окатыши при этом располагали под агломератом, в его слое в различных вариантах и над ним. Содержание окатышей изменяли в интервале от 10 до 90% от расхода железорудной части шихты (100%). Кроме того, проводили исследования с шихтой, включающей помимо железорудного сырья добавочные материалы, такие как коксовый орешек, марганцевая и железная руды, которые перемещали в слое агломерата как совместно с окатышами, так и отдельно в условиях размещения окатышей в нижней части бункера или загрузке их в бункер последними. Расход добавочных материалов варьировал от 0 до 12,7% от массы содержимого бункера. Расположение добавочных материалов в бункере БЗУ относительно друг друга было различным. Размещали их как в последовательности убывания объемной доли добавок снизу вверх бункера и наоборот, так и с учетом их насыпной плотности в различных вариантах. Общее количество загружаемых в бункер материалов

изменяли в интервале от 96 до 256 кг, что соответствует интервалу от 12 до 32 т для реальной доменной печи. Таким образом моделировали загрузку в бункер одного и двух скипов одновременно. Исследование двухскиповой загрузки материалов осуществляли в различных вариантах. А именно дублирование режима загрузки первого скипа вторым и независимая загрузка материалов в бункер. Выпуск материалов производили в колошниковое пространство печи при углах открытия шихтового затвора в интервале 35-60°. По ходу выпуска отбирали пробы, рассеивали материалы по классам: 1-3; 3-5; 5-8; 8-10; 10-12; 12-15; 15-17,5; 17,5-25; >25 мм, после чего отделяли компоненты шихты друг от друга и определяли долю каждого материала по мере их истечения. Затем разрабатывали математические зависимости очередности и равномерности поступления из шихтового бункера железорудных материалов по видам и крупности при различных режимах загрузки. Рассчитывали показатели равномерности поступления компонентов шихты из бункера БЗУ по крупности и массе.

### 2.1.1 Показатели оптимизации

В качестве параметра оптимизации использовали два показателя равномерности поступления компонентов шихты из бункера БЗУ. Первый показатель характеризует равномерность поступления шихты по массе каждого из материалов – агломерата, окатышей, коксового орешка и промывочных материалов. Оценивали его вариацией соответствующей переменной по ходу выпуска материала из бункера БЗУ на лоток в соответствии с формулой:

$$K_{\text{КШ}} = 1 - \frac{\sigma_i}{KШ_{\text{ср}}}, \quad (2.2)$$

где  $\sigma_i$  – среднеквадратическое отклонение по массе  $i$ -х порций компонентов шихты, поступающих из бункера;

$KШ_{\text{ср}}$  – среднее значение поступающих из бункера порций шихты по массе.

Второй показатель – равномерность по крупности шихты. Повышение окружной однородности шихты по крупности обеспечит увеличение порозности шихты и, следовательно, уменьшение перепада давления газа в печи в соответствии с формулой

$$\Delta P = \frac{\lambda_{\text{Re}} \cdot w^2 \cdot \rho \cdot H}{2d\varepsilon^2}, \quad (2.3)$$

где  $w$  – скорость газа, м/с;

$\rho$  – плотность газового потока, кг/м<sup>3</sup>;

$\lambda_{\text{Re}}$  – коэффициент сопротивления, являющийся функцией числа Рейнольдса;

$d$  – линейный размер газового потока, м;

$\varepsilon$  – порозность слоя шихты, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Показатель равномерности поступления материалов из бункера БЗУ по крупности включает две составляющих. Первая характеризует однородность шихты по крупности ее компонентов в среднем во всех порциях:

$$O_{\text{ш}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{f_{\text{ЭКВ}}}{f_{\text{СРВ}}} \right)_i, \quad (2.4)$$

где  $f_{\text{ЭКВ}}$ ,  $f_{\text{СРВ}}$  – значение эквивалентной по поверхности и средневзвешенной крупности порций шихты, поступающих из бункера;

$n$  – число порций.

Эквивалентную по поверхности крупность определяли по формуле:

$$f_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sum a_n}{\sum \frac{a_n}{f_n}}, \quad (2.5)$$

где  $a_n$  – процентное содержание материала по порциям, %;

$f_n$  – средняя крупность, мм.

Средневзвешенную крупность материала определяли в соответствии с зависимостью

$$f_{\text{срв}} = \frac{\sum a_n \cdot f_n}{\sum a_n}. \quad (2.6)$$

Вторая составляющая выходного параметра характеризует равномерность распределения однородности шихты по порциям. Оценили ее формулой

$$K_{\text{ш}} = 1 - \sigma\left(\frac{f_{\text{экв}}}{f_{\text{срв}}}\right)_i \cdot n \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_{\text{срв}}}{f_{\text{экв}}}\right)_i, \quad (2.7)$$

где  $\sigma_i$  – среднеквадратическое отклонение однородности  $i$ -х порций шихты ( $f_{\text{экв}}/f_{\text{срв}}$ ) по крупности, поступающих из бункера.

Для достижения наиболее высокой газопроницаемости шихты в условиях равномерного ее распределения по окружности печи необходимо, чтобы каждый из показателей  $O_{\text{ш}}$ ,  $K_{\text{ш}}$  стремился к 1. Перемножив формулы (2.4) и (2.7), получим показатель, характеризующий и величину однородности шихты по крупности, и равномерность распределения ее по ходу выпуска шихты из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи:

$$P_{\text{к}} = \left( 1 - n \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_{\text{срв}}}{f_{\text{экв}}}\right)_i \cdot \sigma\left(\frac{f_{\text{экв}}}{f_{\text{срв}}}\right) \right) \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_{\text{экв}}}{f_{\text{срв}}}\right)_i \quad (2.8)$$

или

$$P_{\text{к}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_{\text{экв}}}{f_{\text{срв}}}\right)_i - \sigma\left(\frac{f_{\text{экв}}}{f_{\text{срв}}}\right)_i, \quad (2.9)$$

где  $P_{\text{к}}$  – показатель равномерности по крупности компонентов шихты в процессе поступления их из бункера БЗУ на лоток.

Зависимость (2.9) должна отражать натуральную величину эквивалентной по поверхности крупности шихтовых материалов, поскольку перепад давления газа в верхней части печи, помимо порозности шихты, также зависит от

крупности кусков и их формы. В связи с этим в формуле (2.3) линейный размер газового потока  $d$  можно представить следующим выражением:

$$d = \frac{4\varepsilon f_{\text{экв}}}{K(1-\varepsilon)}, \quad (2.10)$$

где  $K$  – коэффициент формы, представляющий собой поверхность куска с объемом и поперечными размерами.

Однако для условий данного эксперимента учитывать натуральную величину  $f_{\text{экв}}$  нецелесообразно, поскольку в качестве одного из факторов в исследованиях использовали долю окатышей от железорудной части шихты, крупность которых выше по сравнению с крупностью агломерата в 1,1 раза, а коэффициент  $K$ , используемый в формуле (2.10), меньше в 0,77 раза [427]. Соответственно, при повышении доли окатышей величина линейного размера будет увеличиваться.

В условиях постоянства по крупности каждого из компонентов шихты и изменении их доли относительно друг друга следует, что минимальную величину эквивалентной по поверхности крупности будем наблюдать в опытах с повышенной долей агломерата, а максимальную – в опытах с увеличенным содержанием окатышей.

### **2.1.2 Методы проведения экспериментов и обработки результатов**

Исследования проводили с применением различных методов физического и математического моделирования. В том числе использовались схемы трехфакторного плана Бокса-Бенкена, полного двухфакторного плана. Обработку данных производили дисперсионным, каноническим и регрессионным анализами, последний из которых с применением множественной регрессии в линейном и нелинейном вариантах [428].

При проведении исследований все эксперименты дублировали, после чего находили дисперсию каждого опыта. Затем по критерию Кохрена

определяли однородность данного ряда дисперсий. Обработкой экспериментальных данных выявляли переменные, имеющие наибольшее влияние на выходной параметр для построения математических зависимостей. Значимость коэффициентов полученных уравнений оценивали по критерию Стьюдента. Все полученные зависимости проверяли на адекватность воспроизведения экспериментальных данных по критерию Фишера.

### Дисперсионный анализ

Дисперсионным анализом выявили причины неравномерности распределения агломерата и окатышей в каждом опыте. В качестве выходных переменных (откликов) использовали распределение массы исследуемых материалов по группам крупности и номеру порции. Опыты провели по схеме полного двухфакторного эксперимента с варьированием на трех уровнях (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Матрица планирования эксперимента  $N=3^2$

Номер опыта	Факторы	
	Доля агломерата, располагающегося под окатышами, %	Содержание окатышей, %
1	0	10
2	50	10
3	100	10
4	0	30
5	50	30
6	100	30
7	0	50
8	50	50
9	100	50

Таким образом, для каждого из опытов матрицы планирования  $N=3^2$  (см. таблицу 2.1) были получены двухфакторные дисперсионные комплексы с числом опытов  $N = q \cdot m \cdot n = 5 \cdot 9 \cdot 2 = 90$ , где  $q$  – уровни (категории) фактора  $Q$  (номер порции),  $m$  – категории фактора  $M$  (крупность),  $n$  – число повторений. Число степеней свободы, необходимое для оценки общей дисперсии, составит

$k_Y = k_Q + k_M + k_{QM} + k_{Er}$  или, что то же для данного комплекса,  
 $k_y = q \cdot m \cdot n - 1 = 5 \cdot 9 \cdot 2 - 1 = 89$ .

При этом число степеней свободы  $k_{Er}$ , требуемое для расчета внутригрупповой дисперсии, определяется произведением  $(n - 1)$  на число ячеек плана, то есть  $k_{Er} = q \cdot m \cdot (m - 1)$ .

Группировку данных двухфакторного комплекса всегда можно представить двумя вариантами в формате однофакторного плана. Например, если рассматривать с позиции фактора  $Q$ , то план эксперимента будет выглядеть в соответствии с таблицей 2.2.

Таблица 2.2 – Способ группировки данных в двухфакторном эксперименте с позиции фактора  $Q$

Группы фактора $Q$	$Q_1$				...	$Q_q$			
	$M_1$	$M_2$	...	$M_m$		$M_1$	$M_2$	...	$M_m$
Подгруппы фактора $M$	$M_1$	$M_2$	...	$M_m$	...	$M_1$	$M_2$	...	$M_m$
Результаты наблюдений	$y_{111}$	$y_{121}$	...	$y_{1m1}$	...	$y_{q11}$	$y_{q21}$	...	$y_{qm1}$
	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	$y_{11n}$	$y_{12n}$	...	$y_{1mn}$	...	$y_{q1n}$	$y_{q2n}$	...	$y_{qmn}$

Схема группировки, представленная в таблице 2.2, воспроизводит однофакторный (для кумулятивного фактора  $X$ ) эксперимент с числом  $qm$  групп. Тогда основное дисперсионное тождество имеет вид  $SS_Y = SS_X + SS_{Er}$  с числами степеней свободы  $k_Y = q \cdot m \cdot n - 1$ ,  $k_X = q \cdot m - 1$ ,  $k_{Er} = N - q \cdot m$ , где  $N = q \cdot m \cdot n$ . Для данной классификации полную сумму квадратов рассеивания отклика можно представить в виде

$$SS_Y = \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^m \sum_{t=1}^n (y_{ijt} - \bar{y}_{000})^2 = \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^m \sum_{t=1}^n (\bar{y}_{ij0} - \bar{y}_{000})^2 + \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^m \sum_{t=1}^n (y_{ijt} - \bar{y}_{ij0})^2.$$

Для двухфакторного дисперсионного комплекса факторная (для кумулятивного фактора  $X$ ) сумма квадратов  $SS_X = SS_N + SS_K + SS_{NK}$ , то есть

сумма квадратов между ячейками  $SS_X = \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^m n \cdot (\bar{y}_{ij0} - \bar{y}_{000})^2$  разлагается на

сумму квадратов по фактору  $Q$  (столбцы в матрице эксперимента), сумму квадратов по фактору  $M$  (строки) и сумму квадратов эффекта взаимодействия этих факторов (пересечение строк и столбцов) или

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^m n \cdot (\bar{y}_{ij0} - \bar{y}_{000})^2 &= nm \sum_{i=1}^q (\bar{y}_{i00} - \bar{y}_{000})^2 + nq \sum_{j=1}^m (\bar{y}_{0j0} - \bar{y}_{000})^2 + \\ &+ \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^m (\bar{y}_{ij0} - \bar{y}_{i00} - \bar{y}_{0j0} + \bar{y}_{000})^2, \end{aligned}$$

где  $\bar{y}_{i00} = \frac{1}{nm} \sum_{j=1}^m \sum_{t=1}^n y_{ijt}$  – среднее в  $i$ -столбце,  $i = \overline{1, q}$ ;

$\bar{y}_{0j0} = \frac{1}{nq} \sum_{i=1}^q \sum_{t=1}^n y_{ijt}$  – среднее в  $j$ -строке,  $j = \overline{1, m}$ ;

$\bar{y}_{ij0} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n y_{ijt}$  – среднее в  $ij$ -ячейке;

$\bar{y}_{000} = \frac{1}{qmn} \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^m \sum_{t=1}^n y_{ijt}$  – общее среднее.

Тогда план двухфакторного дисперсионного комплекса будет выглядеть в соответствии с таблицей 2.3.

Для двухфакторного дисперсионного анализа с  $n$  наблюдениями для каждого сочетания уровней факторов модель имеет вид

$$y_{ijt} = M(Y) + \alpha_j + \beta_j + (\alpha \cdot \beta)_{ij} + \varepsilon_{ijt},$$

где  $M(Y)$  – математическое ожидание наблюдаемых результатов по всей совокупности наблюдений;

$\alpha_i, \beta_i$  – эффекты факторов  $Q$  и  $M$  соответственно на  $i, j$  уровнях ( $i = \overline{1, q}; j = \overline{1, m}$ );

$(\alpha\beta)_{ij}$  – эффекты взаимодействия факторов  $Q$  и  $M$ ;

$\varepsilon_{ijt}$  – случайные ошибки наблюдаемого в  $(ij)$  ячейке  $t$  – результата,  $t = \overline{1, n}$ .

Для выборки объемом  $N=qmn$  опытов математическое ожидание  $M(Y) = \overline{y_{000}} + \overline{\varepsilon_{000}}$ , где  $\overline{\varepsilon_{000}}$  – средняя ошибка общего среднего. Суммы определяемых эффектов по всем соответствующем для них уровням  $\sum_{i=1}^q \alpha_j = \sum_{j=1}^m \beta_j = \sum_{i=1}^q (\alpha \cdot \beta)_{ij} = \sum_{j=1}^m (\alpha \cdot \beta)_{ij} = 0$ .

Таблица 2.3 – Способ группировки данных двухфакторного дисперсионного комплекса по схеме прямоугольной матрицы

$M$	$Q$				Среднее строк
	$Q_1$	$Q_2$	...	$Q_q$	
$M_1$	$y_{111}, y_{112},$ ..., $y_{11n}$	$y_{211}, y_{212},$ ..., $y_{21n}$	...	$y_{q11}, y_{q12},$ ..., $y_{q1n}$	– $y_{010}$
$M_2$	$y_{121}, y_{122},$ ..., $y_{12n}$	$y_{221}, y_{222},$ ..., $y_{22n}$	...	$y_{q21}, y_{q22},$ ..., $y_{q2n}$	– $y_{020}$
...	...	...	...	...	...
$M_m$	$y_{1m1}, y_{1m2},$ ..., $y_{1mn}$	$y_{2m1}, y_{2m2},$ ..., $y_{2mn}$	...	$y_{qm1}, y_{qm2},$ ..., $y_{qmn}$	– $y_{0m0}$
Среднее столбцов	– $y_{100}$	– $y_{200}$	...	– $y_{q00}$	– $y_{000}$

Параметры, входящие в модель для описания наблюдаемых результатов  $y_{ijt}$ , связаны с соответствующими средними и их средними ошибками следующим образом:

$$\text{среднее строк } \overline{y_{i00}} = M(Y) + \alpha_i + \overline{\varepsilon_{i00}};$$

$$\text{среднее столбцов } \overline{y_{0j0}} = M(Y) + \beta_j + \overline{\varepsilon_{0j0}};$$

$$\text{среднее ячеек } \overline{y_{ij0}} = M(Y) + \alpha_i + \beta_j + (\alpha \cdot \beta)_{ij} + \overline{\varepsilon_{ij0}};$$

$$\text{общее среднее } \overline{y_{000}} = M(Y) + \overline{\varepsilon_{000}}.$$

Таким образом, дисперсионный анализ в двухфакторном комплексе был выполнен на основе формул, приведенных в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Основные формулы результатов дисперсионного анализа полного двухфакторного комплекса с одинаковым повторением опытов в каждой ячейке плана

Источник изменчивости	Число степеней свободы	Сумма квадратов отклонений	Оценка дисперсий
Между столбцами	$k_Q = q - 1$	$SS_Q = mn \sum_{i=1}^q (\bar{y}_{i00} - \bar{y}_{000})^2$	$S_Q^2 = \frac{SS_Q}{k_Q}$
Между строками	$k_M = m - 1$	$SS_M = qn \sum_{j=1}^m (\bar{y}_{0j0} - \bar{y}_{000})^2$	$S_M^2 = \frac{SS_M}{k_M}$
Взаимодействие	$k_{QM} = (q - 1)(m - 1)$	$SS_{QM} = n \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^m (\bar{y}_{ij0} - \bar{y}_{i00} - \bar{y}_{0j0} + \bar{y}_{000})^2$	$S_{QM}^2 = \frac{SS_{QM}}{k_{QM}}$
Внутри ячеек	$k_{Er} = qm \cdot (n - 1)$	$SS_{Er} = \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^m \sum_{t=1}^n (y_{ijt} - \bar{y}_{ij0})^2$	$S_{Er}^2 = \frac{SS_{Er}}{k_{Er}}$
Общая сумма	$k_Y = qm \cdot (n - 1)$	$SS_Y = \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^m \sum_{t=1}^n (y_{ijt} - \bar{y}_{000})^2$	–

Для оценки достоверности выводов по результатам анализа двухфакторного дисперсионного комплекса определяли дисперсионные отношения Фишера [429] соответственно для входных переменных  $Q$  и  $M$  и их взаимодействия:

$$F_Q = \frac{S_Q^2}{S_{Er}^2}; F_M = \frac{S_M^2}{S_{Er}^2}; F_{QM} = \frac{S_{QM}^2}{S_{Er}^2}.$$

В завершение оценивали долю источника рассеивания в общей их сумме  $SS_Y = SS_Q + SS_M + SS_{QM} + SS_{Er}$ , используя соответствующие корреляционные отношения вида:

$$\eta_Q^2 = \frac{SS_Q}{SS_Y}; \eta_M^2 = \frac{SS_M}{SS_Y}; \eta_{QM}^2 = \frac{SS_{QM}}{SS_Y}; \eta_{Ouu}^2 = \frac{SS_{Ouu}}{SS_Y}.$$

### Регрессионный и канонический анализы

Регрессионным и каноническим анализом выявляли зависимость между основными параметрами загрузки и показателями равномерности поступления компонентов шихты в колошниковое пространство печи. Для этого

исследовали многомерный массив данных объемом  $n=104$ , включающий параметры загрузки (блок М) и показатели равномерности (блок К).

В блок М вошли следующие переменные (таблица 2.5):  $Ш_{ок}$  и  $A_{доб}$  – характеризующие последовательность загрузки в бункер бесконусного загрузочного устройства компонентов шихты (агломерат, окатыши, коксовый орешек, железная руда, марганцевая руда), представленные как  $Ш_{ок}$  – доля материалов от их расхода (%), располагаемых в бункере БЗУ под окатышами (0-100%),  $A_{доб}$  – доля материалов (%), располагаемых в бункере БЗУ под добавочными материалами (0-100%),  $Д_{ок}$  – содержание окатышей (10-90%) от расхода железорудной части шихты (100%),  $Д_{доб}$  – расход добавочных материалов (1,2–12,7% от массы материалов, загружаемых в бункер БЗУ),  $M_5$  – количество скипов в бункере БЗУ (1-2 шт.).

В блок К «показатель равномерности – показатели равномерности поступления агломерата  $K_A$ , окатышей  $K_{ок}$ , коксового орешка  $K_{ор}$  и промывочных материалов  $K_{пр}$  из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи. Оценивали ее вариацией соответствующей переменной по ходу выпуска материала из бункера БЗУ на лоток в соответствии с формулой (2.2). Обработку данных выполнили в системе STATISTICA®. В основу положена корреляционная матрица признаков, представленных в таблицу 2.5.

Таблица 2.5 – Числовые характеристики исследуемых данных

Категория	Среднее	Доверительный интервал, %		Минимум	Максимум	Дисперсия	Стандартное отклонение
		-95	+95				
$Ш_{ок}$	49,1	39,7	58,5	0,0	100,0	2107,2	45,9
$A_{доб}$	49,5	41,0	58,0	0,0	100,0	1730,8	41,6
$Д_{ок}$	41,8	37,3	46,4	10,0	90,0	499,4	22,3
$Д_{доб}$	5,9	4,9	6,8	1,50	16,3	22,2	4,7
$K_A$	0,5	0,5	0,6	-1,2	0,9	0,1	0,3
$K_{ок}$	0,3	0,3	0,4	-0,9	0,9	0,2	0,4
$K_{ор}$	0,02	-0,1	0,1	-1,3	0,8	0,3	0,5
$K_{пр}$	0,2	0,1	0,3	-1,0	0,8	0,1	0,4

Регрессионный анализ осуществили с применением множественной регрессии в линейном и нелинейном вариантах [430]. Каноническим анализом оценили совокупную взаимосвязь факториальных (блок М) и результативных (блок Т) признаков, суть которого заключается в оценке корреляционной связи между обобщенными (каноническими) переменными  $U$  и  $V$ , представленными как линейные комбинации весовых коэффициентов с наборами признаков, входящих в блоки М и Т соответственно.

По определению:

$$\begin{cases} U = \sum_{j=1}^k \alpha_j M_j = \alpha^T M \\ V = \sum_{j=1}^q \beta_j K_j = \beta^T K, \end{cases}$$

где  $\alpha_j$  ( $j = \overline{1, k}$ ) и  $\beta_j$  ( $j = \overline{1, q}$ ) – искомые весовые коэффициенты, определяемые для поиска корреляционной связи ( $\rho_{UV}$ )  $k$  – признаков блока М (входных) и  $q$  – признаков блока К (выходных);  
 $\alpha^T, \beta^T$  – транспонированные векторы весовых коэффициентов для соответствующих  $U$  и  $V$  канонических переменных.

В каноническом анализе связь между переменными  $U$  и  $V$  определяли как обычную парную корреляцию:

$$\rho_{UV} = \frac{\text{Cov}(U, V)}{\sqrt{\text{Var}U \cdot \text{Var}V}} = \frac{\alpha^T \Sigma_{12} \beta}{\sqrt{(\alpha^T \Sigma_{11} \alpha) \cdot (\beta^T \Sigma_{22} \beta)}},$$

где  $\Sigma_{11}$ ,  $\Sigma_{22}$ ,  $\Sigma_{21} = \Sigma_{12}$  – составные части общей корреляционной матрицы  $\Sigma$ ,

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \Sigma_{11} & \Sigma_{12} \\ \Sigma_{21} & \Sigma_{22} \end{pmatrix};$$

$\text{Cov}(U, V)$  – ковариация переменных  $U$  и  $V$ ;

$\text{Var}U, \text{Var}V$  – вариации переменных признаков  $U$  и  $V$  соответственно.

Причем для стандартизованных переменных  $U$  и  $V$  каноническая

корреляция  $\rho_{UV} = \alpha^T \Sigma_{12} \beta$ , так как выполнены ограничения на вариации  $VarU = VarV = 1$ .

Задачу поиска  $\max \rho_{UV}$  при указанных ограничениях решали методом Лагранжа. Функция Лагранжа данной задачи имеет вид

$$L(\alpha, \beta, \lambda, \mu) = 2\alpha^T \Sigma_{12} \beta + \lambda(1 - \alpha^T \Sigma_{11} \alpha) + \mu(1 - \beta^T \Sigma_{22} \beta),$$

где  $\lambda$  и  $\mu$  – множители Лагранжа;  $\alpha$  и  $\beta$  – искомые векторы для соответствующих линейных комбинаций  $U$  и  $V$ .

При приравнении к нулю соответствующих частных производных  $\frac{\partial L}{\partial \alpha} = 0$  и  $\frac{\partial L}{\partial \beta} = 0$  приходим первоначально к системе уравнений

$$\begin{cases} \Sigma_{12} \beta - \lambda \Sigma_{11} \alpha = 0 \\ \Sigma_{21} \alpha - \mu \Sigma_{22} \beta = 0 \end{cases},$$

и в силу того, что  $Cov(U, V) = Cov(V, U)$  или  $\alpha^T \Sigma_{12} \beta = \beta^T \Sigma_{21} \alpha$ , а также с учетом принятых выше ограничений, для переменных  $U$  и  $V$  получается, что  $\lambda = \mu$  и, следовательно, задача поиска сводится к решению системы

$$\begin{cases} -\lambda \Sigma_{11} \alpha + \Sigma_{12} \beta = 0 \\ \Sigma_{21} \alpha - \lambda \Sigma_{22} \beta = 0 \end{cases} \text{ или } \begin{pmatrix} -\lambda \Sigma_{11} & \Sigma_{12} \\ \Sigma_{21} & -\lambda \Sigma_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = 0.$$

Поиск корней характеристических уравнений с помощью данной системы затруднителен, так как матричные коэффициенты, вошедшие в данную систему, как правило, имеют не одинаковую размерность, в нашем случае  $k \neq q$ , где  $k = 5$ ,  $q = 4$ . Поэтому в алгоритме поиска решений использовали преобразованную систему:

$$\begin{cases} (\Sigma_{11}^{-1} \Sigma_{12} \Sigma_{22}^{-1} \Sigma_{21} - \lambda^2 E) \alpha = 0, \\ (\Sigma_{22}^{-1} \Sigma_{21} \Sigma_{11}^{-1} \Sigma_{12} - \lambda^2 E) \beta = 0, \end{cases}$$

где  $E$  – единичные матрицы размера  $k \times k$  и  $q \times q$  в соответствующих уравнениях преобразованной системы. При этом определяли собственные числа  $\lambda^2$ , а не  $\lambda$ , как это было в исходной системе.

Решением преобразованной системы матричных уравнений являются собственные числа  $\lambda_i^2 > 0$ ,  $i = \overline{1, k}$ ,  $k = \text{rank} \Sigma_{12} = \text{rank} \Sigma_{21}$  и соответствующие им собственные векторы  $\alpha^{(i)}$  и  $\beta^{(i)}$ ,  $i, j = \overline{1, k}$ , размерность и координаты которых (весовые коэффициенты) определяли из уравнений преобразованной системы.

Очевидно также, что с помощью исходной системы уравнений, например из матричного уравнения  $\lambda_i \sum_{11} \alpha^i = \sum_{12} \beta^i$ , при умножении его слева на  $(\alpha^{(i)})^T$ , устанавливается смысл  $\lambda_i = \rho_i$ .

Каждый из определяемых корней  $\lambda_i^2 = \rho_i^2$  был проверен на статистическую значимость, исходя из  $\chi_i^2$  – статистики.

$$\chi^2 = - \frac{\left[ n - 1 - p - \frac{1}{2}(k + q + 1) \right] \ln \Lambda_p}{\left[ (k - p)(q - p) \right]},$$

где  $p = 0, 1, 2$ ;  $\Lambda_p = \prod_{i=p+1}^k (1 - \hat{\lambda}_i^2)$ .

В завершении вычислили весовые коэффициенты для стандартизованных переменных  $U$  и  $V$ , а также оценили корреляционную связь между ними. Результаты интерпретировали двумя способами. Первый может быть схож с интерпретацией коэффициентов множественной регрессии: чем больше абсолютное значение канонического веса, предписываемого признаку (регрессору), тем больше его абсолютный вклад в каноническую переменную. Вторая интерпретация, схожая с той, как в факторном анализе, интерпретируют нагрузки: чем больше абсолютное значение канонического веса, тем больше теснота связи данной переменной

(исходного признака) с канонической переменной. При этом рассматривалась упрощенная факторная модель (без учета специфических факторов) применительно для канонических переменных  $U = W_u F$  и  $V = W_v F$ , где  $W_u$  и  $W_v$  – векторы нагрузочных коэффициентов,  $F$  – матрица общих факторов,  $F = (F_1, F_2, \dots, F_c)^T$ ,  $c \leq k$ . Факторы, так же как и канонические переменные, выражены в стандартизованном масштабе, то есть  $M(F_j) = 0$  и  $D(F_j) = 1$ ,  $j = \overline{1, c}$ , и тогда ковариационные матрицы  $D(U) = \sum_{11} \approx W_u W_u^K$ ,  $D(V) = \sum_{22} \approx W_v W_v^K$ . С учетом того, что  $Cov(U, V) = Cov(W_u \cdot F, W_v \cdot F) = W_u W_v^T$ , следует, что связь возникает под влиянием наиболее весомых факторов (главных компонент) матриц  $\sum_{11}$  и  $\sum_{22}$ . При этом целесообразно предположить, что число факторов  $c \leq \min[\text{rank}(W_u, W_v)]$ .

## **2.2 Разработка математических зависимостей очередности и равномерности поступления из шихтового бункера железорудных материалов по видам и крупности при различных режимах загрузки**

Железорудная часть шихты, загружаемая в доменные печи ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», состоит из агломерата фабрик № 2, 3, 4, окатышей ССГПО, Михайловского ГОК, Лебединского ГОК, Костомукшского ГОК и добавочных материалов, таких как коксовый орешек или коксовая фракция, промывочные материалы, материалы, формирующие гарнисаж. В настоящее время содержание окатышей от железорудной части шихты варьируется от 30 до 40%. Иногда их долю уменьшают до 0,25% или увеличивают до 0,60%.

На доменных печах, оснащенных компактным БЗУ лоткового типа, применяются различные режимы набора добавочных материалов в скип, в том числе окатышей – на дно скипа, наверх или вперемешку. Такие режимы обеспечивают следующую последовательность набора материалов в скип:

<b>Режим добавки наверх</b>		<b>Режим добавки на дно</b>	
			
№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
- Окатыши	- Орешек	- Агломерат	- Агломерат
- Орешек	- Окатыши	- Окатыши	- Орешек
- Кварцит	- Кварцит	- Орешек	- Окатыши
- Агломерат	- Агломерат	- Кварцит	- Кварцит

В бункер БЗУ компоненты шихты поступают в обратном порядке. В связи с этим исследовали закономерности поступления компонентов шихты из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи в зависимости от условий загрузки согласно пункту 2.1.

### 2.2.1 Фракционный состав агломерата

Исследовали действие содержания фракции 1-5 мм в интервале от 1 до 18% при одновременном изменении содержания фракции (1-10) мм от 10 до 90% на показатель равномерности поступления агломерата из бункера в колошниковое пространство печи ( $K_{кш}$ ), рассчитанный по формуле (2.2) [67, 247, 431]. Фракцию 1-5 мм в смеси с агломератом крупностью -10 мм загружали под фракцией +10 мм над ней и в среднем ее слое. Также фракции +10 мм располагали в слое агломерата крупностью -10 мм.

Размещение агломерата фракции 1-5 мм в количестве 5,5 % от его расхода в смеси с агломератом фракции (-10) мм под агломератом крупностью +10 мм при средневзвешенной крупности всего агломерата 12,2 мм сопровождалось поступлением максимального количества класса 1-5 мм в начале выпуска (рисунок 2.3). В порциях, сформированных в период от 10 до 30% времени от общей продолжительности выпуска, эквивалентная по поверхности крупность агломерата была ниже средней исходной ее величины (рисунок 2.4, А – соотношение крупности менее единицы). По истечении 40% времени от общей продолжительности выпуска содержание фракции 1-5 мм в формируемых по ходу выпуска порциях уменьшалось в соответствии с выражением (2.13) ( $R^2 = 0,99$ ).

Крупность поступающего из бункера агломерата превышала исходную среднюю ее величину (соотношение крупности более единицы). Средняя величина показателя равномерности поступления фракции 1-5 мм составила 0,71 [67].

$$A_{1-5}^n = 5,7 - 0,67 \cdot e^{\tau_{\text{фп}}} - \frac{0,05 \ln(\tau_{\text{фп}})}{\tau_{\text{фп}}^2}, \quad (2.11)$$

где  $A_{1-5}^n$  – содержание агломерата фракции 1-5 мм по ходу выпуска при загрузке его под фракцией +10 мм;

$\tau_{\text{фп}}$  – доля времени формирования порции от общей продолжительности выпуска, 0-1.

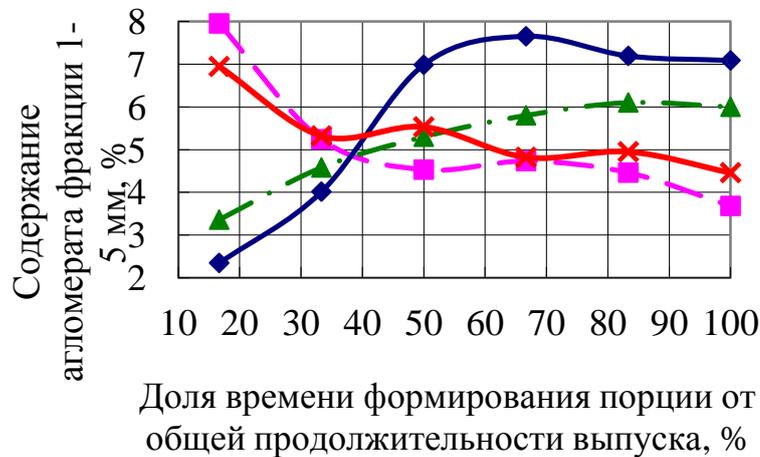


Рисунок 2.3 – Содержание агломерата фракции -5 мм по мере истечения материала из бункера БЗУ при загрузке фракции -5 мм совместно с крупностью -10 мм в бункер под фракцию +10 мм (—■—), над ней (—◆—), в средний ее слой (—▲—) и расположении фракции +10 мм в слое агломерата крупностью -10 мм (—✕—)

При загрузке фракции 1-5 мм в составе агломерата крупностью (-10) мм после класса +10 мм в начале выпуска наблюдали минимальное содержание фракции 1-5 мм с последующим увеличением ее количества в порциях, формируемых по ходу выпуска согласно уравнению (2.12) ( $R^2 = 0,99$ ). Средняя величина показателя равномерности поступления фракции 1-5 мм составила 0,63 [67]:

$$A_{1-5}^n = \tau_{\text{фп}}^{1,88} e^{-4,21-2,52 \cdot 10^{-2} \tau_{\text{фп}}}, \quad (2.12)$$

где  $A_{1-5}^h$  – содержание агломерата фракции 1-5 мм по ходу выпуска при загрузке его над фракцией +10 мм;

$\tau_{\text{фп}}$  – доля времени формирования порции от общей продолжительности выпуска, 0-100%.

Загрузка агломерата крупностью 1-5 мм в смеси с агломератом класса (-10 мм) в середину слоя фракции +10 мм обеспечивала величину показателя равномерности поступления агломерата класса 1-5 мм, равную 0,80. Характер изменения отношения эквивалентной по поверхности крупности агломерата по мере истечения его из бункера БЗУ к исходной ее величине незначительно отличался от такового при загрузке мелкого агломерата над слоем крупного (сравнение рисунков 2.4, А, Б). В начале выпуска поступали крупные частицы агломерата. По ходу выпуска крупность шихты уменьшалась и в последней порции отношение эквивалентной по поверхности крупности к исходной величине составляла 0,9. Максимальную величину показателя равномерности поступления агломерата крупностью 1-5 мм, равную 0,84, добились путем загрузки агломерата класса +10 между фракцией (-10) мм. Изменение эквивалентной по поверхности крупности агломерата по ходу выпуска было следующим: вначале поступали мелкие частицы шихты, после истечения 33,3% времени от общей продолжительности выпуска наблюдали среднюю ее величину (см. рисунок 2.4, Б). Распределение агломерата фракции 1-5 мм по ходу выпуска при расположении мелкого агломерата в слое крупного и при размещении фракции +10 мм в слое агломерата (-10 мм) описывают соответственно уравнения (2.13) и (2.14) [67].

$$A_{1-5}^c = 7,8 + 8,3\tau_{\text{фп}}^2 \cdot \ln(\tau_{\text{фп}}) - \frac{0,689}{\tau_{\text{фп}}}, R^2 = 0,98 \quad (2.13)$$

где  $A_{1-5}^c$  – содержание агломерата фракции 1-5 мм по ходу выпуска при загрузке его в середину слоя фракции +10 мм;

$\tau_{\text{фп}}$  – доля времени формирования порции от общей продолжительности выпуска, 0-1.

$$A_{1-5}^{\text{нп}} = 5,5 - 2,21 \cdot 10^{-5} \tau_{\text{фп}}^2 \ln(\tau_{\text{фп}}) + 3,53 \cdot 10^7 e^{-\tau_{\text{фп}}}, R^2 = 0,93, \quad (2.14)$$

где  $A_{1-5}^{\text{нп}}$  – содержание агломерата фракции 1-5 мм по ходу выпуска при загрузке фракции +10 мм в середину слоя класса -10 мм;

$\tau_{\text{фп}}$  – доля времени формирования порции от общей продолжительности выпуска, 0-100%.

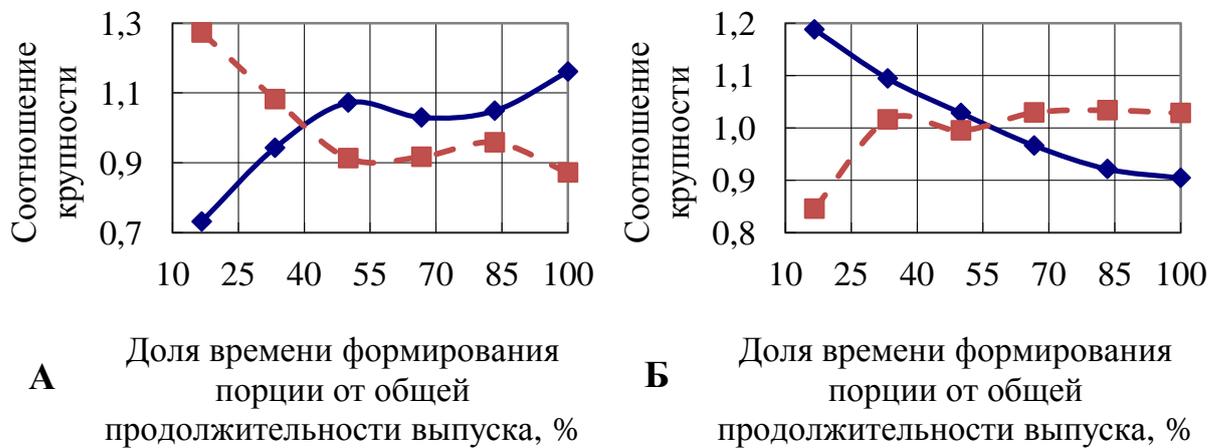


Рисунок. 2.4 – Изменение отношения эквивалентной по поверхности крупности агломерата по мере истечения его из бункера БЗУ к исходной ее величине, при загрузке фракции -5 мм в бункере под фракцию +10 мм (—◆—, рисунок А), над ней (—■—, рисунок А), в средний ее слой (—◆—, рисунок Б) и расположении фракции +10 мм в слое агломерата крупностью -10 мм (—■—, рисунок Б)

Таким образом, можно сделать вывод, что для уменьшения содержания мелких фракций в осевой зоне доменной печи необходимо координировать последовательность загрузки компонентов шихты и направление движения углового положения лотка. При загрузке материала меньшей крупностью в нижнюю часть бункера БЗУ целесообразно производить выпуск в направлении движения лотка от периферии к центру. В условиях размещения материала меньшей крупностью в слое более крупного материала или над ним

целесообразно изменение направления движения лотка от осевой зоны к периферии.

Увеличение содержания фракции 1-5 мм в агломерате в интервале от 1 до 10% при одновременном росте фракции (-10) мм от 10 до 90% за счет снижения доли агломерата крупностью +10 мм незначительно влияло на перераспределение агломерата фракции 1-5 мм в сформированных по ходу выпуска порциях (рисунок 2.5). Средняя величина показателя равномерности составляет 0,88. Увеличение содержания фракции 1-5 мм от 10 до 18% значительно ухудшало равномерность ее поступления из бункера в колошниковое пространство печи. В первых порциях содержание мелочи составляло в среднем 10 %, а по истечении 60% времени выпуска материала от общей его продолжительности – 25%. Показатель равномерности снизился от 0,88 до 0,62. В связи с этим превышение содержания фракции 1-5 мм границы в 10% будет отрицательно сказываться на газодинамике доменного процесса в отдельных секторах печи и, следовательно, сопровождаться ухудшением технико-экономических показателей.

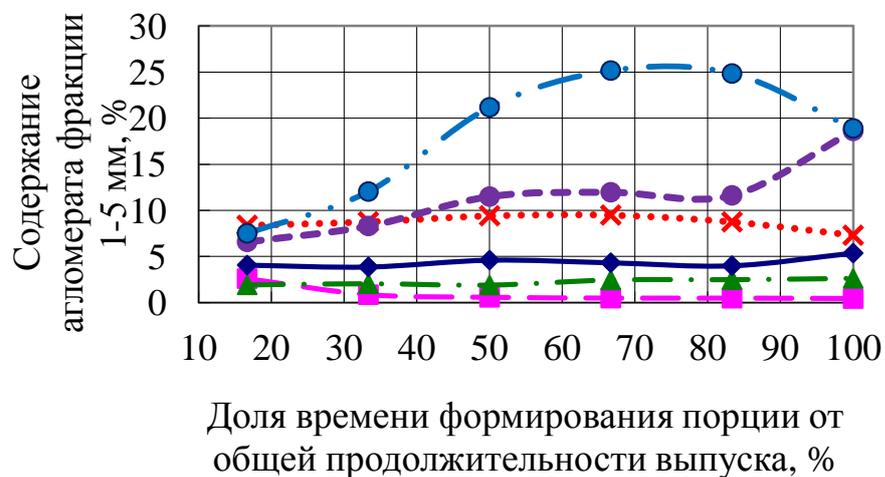


Рисунок 2.5 – Содержание агломерата фракции 1-5 мм по мере истечения материала из бункера БЗУ при содержании ее в агломерате 1 ( -■- ), 2,5 ( -▲- ), 4,5 ( -◆- ), 9 ( -×- ), 11,5 ( -◆- ) и 18 % ( -◆- )

Показатель равномерности агломерата всех фракций описывается уравнениями (2.17) и (2.18) [247]:

$$K_{A1} = 0,792 + 0,047 A_{D>10} - 0,095 A_{D>10} A_{(-10)} - 0,338 A_{D>10}^2 - 0,047 A_{(-10)}^2, \quad (2.15)$$

где  $A_{D>10}$  – содержание агломерата фракции +10 мм, располагающегося под агломератом фракции -10 мм (0-100), %;

$A_{(-10)}$  – содержание агломерата фракции -10 мм от его общего количества (10-90), %.

$$K_{A2} = 0,757 - 0,047 A_{D<10} - 0,021 A_{(-10)} - 0,095 A_{D>10} A_{(-10)} - 0,301 A_{D<10}^2 - 0,051 A_{(-10)}^2, \quad (2.16)$$

где  $A_{D<10}$  – содержание агломерата фракции (-10) мм, располагающегося под агломератом фракции +10 мм (0-100), %;

$A_{(-10)}$  – содержание агломерата фракции -10 мм от его общего количества (10-90), %;

По критерию Фишера произвели проверку адекватности моделей и убедились в том, что уравнение соответствует экспериментальным данным. Коэффициенты детерминации  $R^2$ , равные соответственно 0,98 и 0,99, показывает, что построенная регрессия объясняет более 98% разброса значений переменной  $K_A$  относительно среднего.

При содержании в шихте агломерата фракции +10 мм 90% и класса (-10) мм 10% в условиях размещения их в бункере БЗУ в следующей последовательности: на дно бункера БЗУ крупный агломерат, затем мелкий, обеспечивало величину показателя равномерности, равную 0,68 (рисунок 2.6, А). Загрузка в нижнюю часть бункера БЗУ мелкого агломерата с долей 0,1, после чего крупного с долей 0,9, понижала величину показателя равномерности от 0,68 до 0,21. Уменьшение содержания агломерата крупностью +10 мм в шихте от 90 до 10% за счет увеличения фракции (-10) мм от 10 до 90% при размещении в бункере БЗУ фракции +10 мм над фракцией (-10) мм сопровождалось ростом показателя равномерности от 0,21 до 0,73. В условиях

расположения фракции +10 мм под фракцией (-10) мм величина показателя равномерности уменьшалась от 0,68 до 0,14.

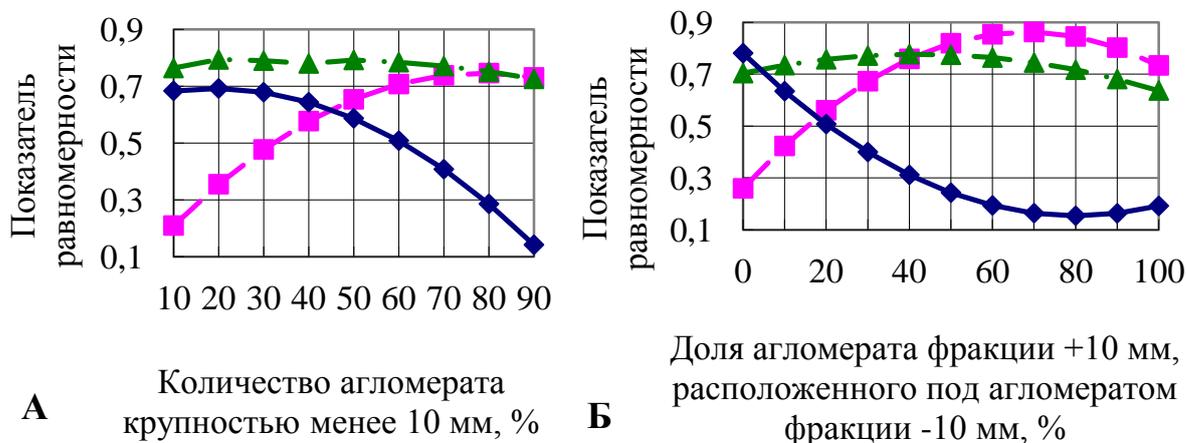


Рисунок 2.6 – Зависимость равномерности поступления агломерата из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи от различных факторов:

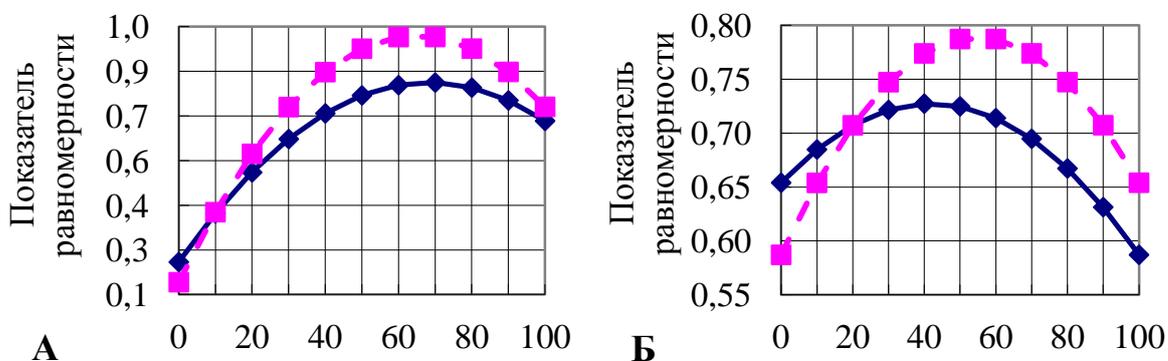
А – доли фракции -10 мм при расположении ее в среднем слое фракции +10 мм ( --▲-- ) под ней ( -■- ), на ней ( ◆ );

Б – доли фракции +10 мм расположенной под фракцией -10 мм при содержании в шихте последней: 10 % ( -■- ), 50 % ( --▲-- ) и 90 % ( ◆ )

Из этого следует, что показатель равномерности поступления агломерата имеет более высокую величину, равную 0,21 против 0,14, при расположении агломерата крупных классов над мелкой фракцией по сравнению с режимом загрузки, предполагающим размещение в нижней части бункера крупного агломерата, после чего фракцию (-10) мм. Это является результатом более быстрого перемещения крупного агломерата к выпускному отверстию, по сравнению с агломератом класса (-10) мм при загрузке каждого из них в бункер последним. Анализ закономерностей поступления фракций агломерата по ходу выпуска показал, что в первых двух порциях, сформированных по истечении 33,3% времени после начала выпуска, содержание агломерата крупностью +10 мм превышало содержание агломерата класса (-10) мм на 11,6% отн. Крупные частицы агломерата имеют меньшее число взаимных контактов по сравнению с мелкими, вследствие чего имеют меньшую величину внутреннего и внешнего

трения. Наряду с увеличенной массой отдельных частиц это позволяет быстрее перемещаться им в разрыхленном слое шихты, тем самым улучшая равномерность поступления агломерата в целом.

Согласно рисунку 2.6 для анализируемых режимов загрузки целесообразно в нижней части бункера располагать материал с подавляющим содержанием его в составе шихты, а поверх него материал с минимальным расходом. Более высокий показатель равномерности, равный 0,81, наблюдали при расположении 10% фракции (-10) мм между порциями агломерата крупностью +10 мм, равными 70 и 30% соответственно, расположенными под и над агломератом мелких классов (рисунок 2.6, Б). Увеличение доли агломерата крупностью (-10) мм от 10 до 50% смещало экстремум в направлении уменьшения доли агломерата класса +10 мм, располагающегося под агломератом крупностью (-10) мм от 70 до 50%. Наиболее высокую величину показателя равномерности наблюдали при размещении агломерата фракции +10 мм в слое класса (-10) мм согласно рисунку 2.7 [247].



Доля агломерата фракции +10 мм в слое класса (-10) мм (-■-) и агломерата фракции (-10) мм в слое класса (+10) мм (-◆-)

Рисунок 2.7 – Изменение показателя равномерности по крупности от режимов загрузки при доле перемещаемой фракции 10 (А) и 50 % (Б)

Из рисунка 2.7, Б следует, что при равных долях крупной и мелкой фракций в составе шихты размещение агломерата крупностью +10 мм в слое класса (-10) мм обеспечивало максимальную величину показателя равномерности, равную 0,79, против 0,73 в условиях расположения фракции (-10) мм в слое +10 мм.

Таким образом, можно сделать вывод, что для обеспечения равномерного распределения железорудного сырья по крупности в процессе выпуска его из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи с целью достижения рационального распределения газового потока через слой шихты по окружности целесообразно материал с более высокой эквивалентной по поверхности крупностью располагать в слое материала с меньшей крупностью. В железорудной части шихты, загружаемой в доменные печи ПАО «ММК», наиболее высокую эквивалентную по поверхности крупность имеют добавочные материалы. А именно ее величина для окатышей составляет в среднем 12 мм, для коксового орешка – 18 мм, а для коксовой фракции и промывочных материалов превышает 30 мм, в то время как для агломерата она составляет 10 мм.

В связи с этим во второй серии экспериментов исследовали влияние последовательности загрузки компонентов шихты на показатель равномерности по крупности материалов  $P_k$  в процессе поступления их из бункера БЗУ на лоток, рассчитанный по формуле (2.9). Для этого окатыши загружали в нижнюю часть бункера БЗУ под агломератом, над ним и в слое между порциями агломерата в различных вариантах: 25:75; 50:50 и 75:25%, расположенными в бункере БЗУ соответственно под и над окатышами. Сравнили их с режимами загрузки агломерата в слой окатышей в различных вариантах: 25:75; 50:50 и 75:25%, расположенными в бункере БЗУ соответственно под и над агломератом. Долю окатышей меняли от 0,1 до 0,9 с шагом 0,2.

Величину показателя равномерности по крупности материалов для различных условий загрузки можно определить из уравнения ( $R^2=0,99$ ) [67]:

$$\begin{aligned}
 P_{k(\text{ЖРС})} = & 0,959 + 0,159 A_{\text{доб}} + 0,22 \ln(D_{\text{ок}}) - 0,383 A_{\text{доб}}^2 + \\
 & + 0,096 \cdot [\ln(D_{\text{ок}})]^2 - 0,264 A_{\text{доб}} \ln(D_{\text{ок}}) + 0,182 A_{\text{доб}}^3 + \\
 & + 0,016 [\ln(D_{\text{ок}})]^3 - 0,043 A_{\text{доб}} [\ln(D_{\text{ок}})]^2 + 0,133 A_{\text{доб}}^2 \ln(D_{\text{ок}}),
 \end{aligned}
 \tag{2.17}$$

где  $A_{\text{доб}}$  – доля агломерата, располагающегося под добавочными материалами в шихтовом бункере БЗУ, (0-1);

$D_{OK}$  – доля окатышей в шихте (0,1-0,9) от расхода железорудного сырья.

Анализ результатов исследований при доле окатышей от железорудной части шихты в пределах 0,25-0,45, что соответствует средним изменениям для условий ПАО «ММК», показывает следующее. Наиболее низкий показатель равномерности по крупности железорудных материалов наблюдали при расположении окатышей в нижней части бункера БЗУ под агломератом [432-435]. Такой режим загрузки компонентов шихты с долей окатышей в ней 0,38 обеспечивает высыпание в начале выпуска крупных частичек (рисунок 2.8, А). По ходу выпуска крупность поступающего на лоток материала уменьшалась. Коэффициент вариации изменения соотношения крупности по ходу выпуска в данном случае имел максимальную величину, равную 13,4 (таблица 2.6), что обеспечивало минимальную величину показателя  $P_k$  (ЖРС), равную 0,82 [436, 437]. Загрузка окатышей в середину слоя агломерата, между порциями, сформированными из него, в количестве 25 и 75% от массы агломерата, расположенными в бункере БЗУ соответственно под и над окатышами, а также после агломерата давали схожие результаты.

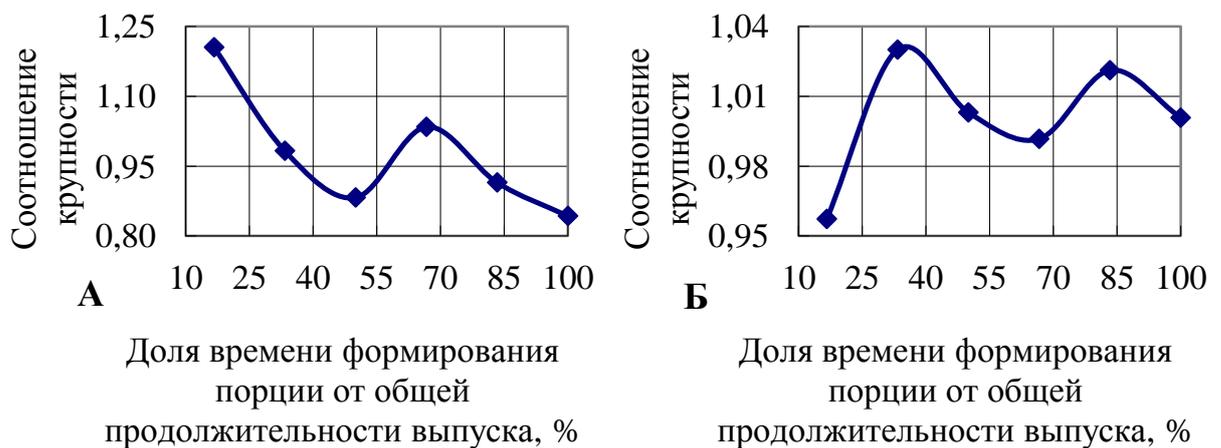


Рисунок 2.8 – Изменение отношения эквивалентной по поверхности крупности железорудных материалов по мере истечения их из бункера БЗУ к исходной ее величине при загрузке окатышей в бункере под агломератом (А), в среднем его слое (Б)

Таблица 2.6 – Изменение показателей равномерности по крупности железорудных материалов по ходу выпуска при различной последовательности загрузки компонентов шихты и доле окатышей, равной 0,38, от расхода ЖРС

Доля агломерата, располагающегося под окатышами в бункере БЗУ, %	Показатель равномерности по крупности материалов в процессе поступления их из бункера БЗУ на лоток, рассчитанный по формуле (2.9) ( $P_{к(ЖРС)}$ )	Коэффициент вариации изменения соотношения эквивалентной по поверхности крупности по ходу выпуска
0	0,82	13,4
25	0,89	2,6
50	0,90	2,5
75	0,89	4,6
100	0,87	4,5

Соотношение крупности по ходу выпуска изменялось незначительно. В начале выпуска наблюдали более высокое содержание мелочи (см. рисунок 2.7, Б), после чего поступали средние по крупности частицы компонентов шихты. Минимальные колебания изменения соотношения эквивалентной по поверхности крупности по ходу выпуска обеспечивает размещение окатышей в середине слоя агломерата (см. таблицу 2.6) [438, 439].

## 2.2.2 Компонентный состав железорудной части шихты

### 2.2.2.1 Односкиповая загрузка железорудных материалов в бункер БЗУ

Наряду с однородным поступлением из бункера БЗУ железорудных материалов по крупности необходимо обеспечивать равномерное окружное распределение по видам компонентов шихты ввиду различия их физико-химических свойств. В связи с этим исследовали действие различных факторов на очередность поступления шихтовых материалов из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи и равномерность их распределения по видам [440].

Распределение окатышей по ходу выпуска при односкиповой загрузке железорудных материалов можно представить в виде уравнения

$$O_{\text{К}} = \frac{(1 - \text{th}(0,375\tau_{\text{фп}} - 25))}{2} \cdot \frac{1}{2} \left[ (1 - \text{th}(\tau_{\text{фп}} / 2 - 25)) \cdot O_{\text{К}_1} + (1 + \text{th}(\tau_{\text{фп}} / 2 - 25)) \cdot \right. \\ \left. + \frac{(1 + \text{th}(0,375\tau_{\text{фп}} - 25)) \cdot O_{\text{К}_2}}{2}, \right. \\ \left. + \frac{(0,06 \cdot \tau_{\text{фп}} - 2,99) \cdot O_{\text{К}_4} + (3,99 - 0,06 \cdot \tau_{\text{фп}}) \cdot O_{\text{К}_3}}{2} \right] + \quad (2.18)$$

где  $O_{\text{К}_{1,2,3,4}}$  – содержание окатышей от суммарной массы материалов в формируемой по ходу выпуска порции за долю времени  $\tau$ ;

$\tau_{\text{фп}}$  – доля времени формирования порции от общей продолжительности выпуска (в интервале 0-100%);

$\text{th}$  – гиперболический тангенс:  $\text{th} = (e^{2x} - 1) / (e^{2x} + 1)$ .

При этом величины  $O_{\text{К}_{1,2,3,4}}$  зависят от интервала, в котором находятся параметры загрузки: доля окатышей в шихте от расхода железорудного сырья  $D_{\text{Ок}}$  и доля агломерата, располагающегося под окатышами в шихтовом бункере БЗУ  $A_{\text{Ок}}$  согласно зависимости 2.19.

Если пренебречь добавочными материалами, а именно коксовым орешком и промывочными материалами, расход которых не вносил существенных изменений в распределение железорудных материалов по ходу выпуска, то содержание агломерата в соответствующей порции можно представить как разность между 100 процентами и содержанием в ней окатышей:  $A = 100 - O_{\text{К}}$ .

При загрузке в бункер одного скипа размещение в нижней его части 10% окатышей от расхода железорудного сырья при загрузке их в составе двухкомпонентной смеси – агломерат и окатыши, трехкомпонентной с добавлением коксового орешка или четырехкомпонентной с введением в состав шихты промывочных материалов обеспечивает поступление более 90% окатышей от их расхода в начале выпуска. При угле открытия шихтового затвора  $50^\circ$  в первой порции согласно уравнению (2.18) их содержание составляет 49% от массы всей порции (рисунки 2.9, А, 2.10, А). Во второй

пробе, отобранной после 33 % времени от общей продолжительности выпуска, содержание окатышей составляет 11%. Оставшиеся порции формировались преимущественно из агломерата [432].

$$\begin{array}{l}
 OK_1 = OK_{10}^{(0 \leq \tau \leq 50)}_{(0 \leq A_{OK} \leq 50)}, OK_2 = OK_{10}^{(66,7 \leq \tau \leq 100)}_{(0 \leq A_{OK} \leq 50)}, \\
 OK_3 = f\left(OK_{10}^{(0 \leq \tau \leq 50)}_{(0 \leq A_{OK} \leq 50)}[D_{OK}; A_{OK}; \tau = 50]\right) \\
 OK_4 = f\left(OK_{10}^{(66,7 \leq \tau \leq 100)}_{(0 \leq A_{OK} \leq 50)}[D_{OK_2}; A_{OK}; \tau = 66, 7]\right) \\
 OK_1 = OK_{10}^{(0 \leq \tau \leq 50)}_{(50 < A_{OK} \leq 100)}, OK_2 = OK_{10}^{(66,7 \leq \tau \leq 100)}_{(50 < A_{OK} \leq 100)}, \\
 OK_3 = f\left(OK_{10}^{(0 \leq \tau \leq 50)}_{(50 < A_{OK} \leq 100)}[D_{OK_2}; A_{OK}; \tau = 50]\right), \\
 OK_4 = f\left(OK_{10}^{(66,7 \leq \tau \leq 100)}_{(50 < A_{OK} \leq 100)}[D_{OK_2}; A_{OK}; \tau = 66, 7]\right)
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l}
 \\
 \\
 0 \leq A_{OK} \leq 50 \\
 \\
 10 \leq D_{OK} \leq 50 \\
 \\
 \\
 50 < A_{OK} \leq 100
 \end{array} \right\}
 \tag{2.19}$$

$$\begin{array}{l}
 OK_1 = OK_{50}^{(0 \leq \tau \leq 50)}_{(0 \leq A_{OK} \leq 50)}, OK_2 = OK_{50}^{(66,7 \leq \tau \leq 100)}_{(0 \leq A_{OK} \leq 50)}, \\
 OK_3 = f\left(OK_{50}^{(0 \leq \tau \leq 50)}_{(0 \leq A_{OK} \leq 50)}[D_{OK}; A_{OK}; \tau = 50]\right), \\
 OK_4 = f\left(OK_{50}^{(66,7 \leq \tau \leq 100)}_{(0 \leq A_{OK} \leq 50)}[D_{OK_2}; A_{OK}; \tau = 66, 7]\right), \\
 OK_1 = OK_{50}^{(0 \leq \tau \leq 50)}_{(50 < A_{OK} \leq 100)}, OK_2 = OK_{50}^{(66,7 \leq \tau \leq 100)}_{(50 < A_{OK} \leq 100)}, \\
 OK_3 = f\left(OK_{50}^{(0 \leq \tau \leq 50)}_{(50 < A_{OK} \leq 100)}[D_{OK_2}; A_{OK}; \tau = 50]\right), \\
 OK_4 = f\left(OK_{50}^{(66,7 \leq \tau \leq 100)}_{(50 < A_{OK} \leq 100)}[D_{OK_2}; A_{OK}; \tau = 66, 7]\right)
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l}
 \\
 \\
 0 \leq A_{OK} \leq 50 \\
 \\
 50 < D_{OK} \leq 90 \\
 \\
 \\
 50 < A_{OK} \leq 100
 \end{array} \right\}$$

где

$$\begin{aligned}
 OK_{10}^{(0 \leq \tau \leq 50)}_{(0 \leq A \leq 50)} &= 138 + 0,64 D_{OK} - 0,017 D_{OK}^2 - 7,8 A_{OK} + 0,09 A_{OK}^2 - 7,9 \tau_{\text{фп}} + 0,09 \tau_{\text{фп}}^2 - \\
 &- 0,08 D_{OK} A_{OK} + 10^{-3} D_{OK} A_{OK}^2 + 10^{-3} D_{OK}^2 A_{OK} - 1,7 \cdot 10^{-5} D_{OK}^2 A_{OK}^2 + 0,165 D_{OK} \tau_{\text{фп}} - \\
 &- 3 \cdot 10^{-3} D_{OK} \tau_{\text{фп}}^2 - 10^{-3} D_{OK}^2 \tau_{\text{фп}} + 2,1 \cdot 10^{-5} D_{OK}^2 \tau_{\text{фп}}^2 + 0,44 A_{OK} \tau_{\text{фп}} - 5 \cdot 10^{-3} A_{OK} \tau_{\text{фп}}^2 - \\
 &- 5 \cdot 10^{-3} A_{OK}^2 \tau_{\text{фп}} + 6,2 \cdot 10^{-5} A_{OK}^2 \tau_{\text{фп}}^2;
 \end{aligned}
 \tag{2.20}$$

$$\begin{aligned}
O_{10}^{50} \begin{matrix} (66,7 \leq \tau \leq 100) \\ (0 \leq A_{Ok} \leq 50) \end{matrix} &= 22,8 + 2,9 D_{Ok} - 0,07 D_{Ok}^2 - 2,2 A_{Ok} - 4 \cdot 10^{-3} A_{Ok}^2 - 0,31 \tau_{\phi\pi} + \\
&+ 10^{-3} \tau_{\phi\pi}^2 + 0,08 D_{Ok} A_{Ok} + 8,8 \cdot 10^{-4} D_{Ok} A_{Ok}^2 + 1,2 \cdot 10^{-3} D_{Ok}^2 A_{Ok} + 1,7 \cdot 10^{-5} D_{Ok}^2 A_{Ok}^2 - \\
&- 0,08 D_{Ok} \tau_{\phi\pi} + 4,8 \cdot 10^{-4} D_{Ok} \tau_{\phi\pi}^2 - 2,3 \cdot 10^{-3} D_{Ok}^2 \tau_{\phi\pi} - 1,4 \cdot 10^{-5} D_{Ok}^2 \tau_{\phi\pi}^2 + \\
&+ 0,06 A_{Ok} \tau_{\phi\pi} - 4,4 \cdot 10^{-4} A_{Ok} \tau_{\phi\pi}^2 - 2,6 \cdot 10^{-4} A_{Ok}^2 \tau_{\phi\pi} + 4,2 \cdot 10^{-6} A_{Ok}^2 \tau_{\phi\pi}^2; \quad (2.21)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
O_{10}^{50} \begin{matrix} (0 \leq \tau \leq 50) \\ (50 < A_{Ok} \leq 100) \end{matrix} &= 80,5 - 4,7 D_{Ok} + 0,04 D_{Ok}^2 - 2,0 A_{Ok} + 0,01 A_{Ok}^2 - 1,3 \tau_{\phi\pi} - \\
&- 7,2 \cdot 10^{-3} \tau_{\phi\pi}^2 + 0,04 D_{Ok} A_{Ok} - 2,3 \cdot 10^{-4} D_{Ok} A_{Ok}^2 - 1,7 \cdot 10^{-4} D_{Ok}^2 A_{Ok} + \\
&+ 9 \cdot 10^{-7} D_{Ok}^2 A_{Ok}^2 + 0,25 D_{Ok} \tau_{\phi\pi} - 3,0 \cdot 10^{-3} D_{Ok} \tau_{\phi\pi}^2 - 2,1 \cdot 10^{-3} D_{Ok}^2 \tau_{\phi\pi} + \\
&+ 2,5 \cdot 10^{-5} D_{Ok}^2 \tau_{\phi\pi}^2 + 0,04 A_{Ok} \tau_{\phi\pi} - 1,4 \cdot 10^{-4} A_{Ok} \tau_{\phi\pi}^2 - 5 \cdot 10^{-4} A_{Ok}^2 \tau_{\phi\pi} + 5,7 \cdot 10^{-6} A_{Ok}^2 \tau_{\phi\pi}^2; \quad (2.22)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
O_{10}^{50} \begin{matrix} (66,7 \leq \tau \leq 100) \\ (50 < A_{Ok} \leq 100) \end{matrix} &= -924 + 10,4 D_{Ok} - 0,16 D_{Ok}^2 + 20,5 A_{Ok} - 0,11 A_{Ok}^2 + 19,2 \tau_{\phi\pi} - \\
&- 0,1 \tau_{\phi\pi}^2 - 0,04 D_{Ok} A_{Ok} + 2,4 \cdot 10^{-4} D_{Ok} A_{Ok}^2 + 3,2 \cdot 10^{-4} D_{Ok}^2 A_{Ok} - \\
&- 1,9 \cdot 10^{-6} D_{Ok}^2 A_{Ok}^2 - 0,19 D_{Ok} \tau_{\phi\pi} + 1,1 \cdot 10^{-3} D_{Ok} \tau_{\phi\pi}^2 + 3,5 \cdot 10^{-3} D_{Ok}^2 \tau_{\phi\pi} - \\
&- 2,0 \cdot 10^{-5} D_{Ok}^2 \tau_{\phi\pi}^2 - 0,41 A_{Ok} \tau_{\phi\pi} + 2 \cdot 10^{-3} A_{Ok} \tau_{\phi\pi}^2 + 2,1 \cdot 10^{-3} A_{Ok}^2 \tau_{\phi\pi} - 10^{-5} A_{Ok}^2 \tau_{\phi\pi}^2; \quad (2.23)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
O_{50}^{90} \begin{matrix} (0 \leq \tau \leq 50) \\ (0 \leq A_{Ok} \leq 50) \end{matrix} &= 440 - 10,9 D_{Ok} + 0,08 D_{Ok}^2 - 4,7 A_{Ok} + 0,05 A_{Ok}^2 - 24,4 \tau_{\phi\pi} + 0,28 \tau_{\phi\pi}^2 - \\
&- 0,04 D_{Ok} A_{Ok} + 2,7 \cdot 10^{-4} D_{Ok} A_{Ok}^2 + 3,8 \cdot 10^{-4} D_{Ok}^2 A_{Ok} - 1,7 \cdot 10^{-6} D_{Ok}^2 A_{Ok}^2 + \\
&+ 0,75 D_{Ok} \tau_{\phi\pi} - 9,3 \cdot 10^{-3} D_{Ok} \tau_{\phi\pi}^2 - 5,5 \cdot 10^{-3} D_{Ok}^2 \tau_{\phi\pi} - 7,0 \cdot 10^{-5} D_{Ok}^2 \tau_{\phi\pi}^2 + \\
&+ 0,32 A_{Ok} \tau_{\phi\pi} - 4 \cdot 10^{-3} A_{Ok} \tau_{\phi\pi}^2 - 3,7 \cdot 10^{-3} A_{Ok}^2 \tau_{\phi\pi} - 5,5 \cdot 10^{-5} A_{Ok}^2 \tau_{\phi\pi}^2; \quad (2.24)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
O_{50}^{90} \begin{matrix} (66,7 \leq \tau \leq 100) \\ (0 \leq A_{Ok} \leq 50) \end{matrix} &= -601 + 16,4 D_{Ok} - 0,09 D_{Ok}^2 - 1,73 A_{Ok} - 8 \cdot 10^{-3} A_{Ok}^2 + 15,3 \tau_{\phi\pi} - \\
&- 0,095 \tau_{\phi\pi}^2 + 6,3 \cdot 10^{-3} D_{Ok} A_{Ok} + 2,8 \cdot 10^{-3} D_{Ok} A_{Ok}^2 - 8,3 \cdot 10^{-5} D_{Ok}^2 A_{Ok} - \\
&- 2,7 \cdot 10^{-6} D_{Ok}^2 A_{Ok}^2 - 0,4 D_{Ok} \tau_{\phi\pi} + 2,4 \cdot 10^{-3} D_{Ok} \tau_{\phi\pi}^2 + 2,5 \cdot 10^{-3} D_{Ok}^2 \tau_{\phi\pi} - \\
&- 1,5 \cdot 10^{-5} D_{Ok}^2 \tau_{\phi\pi}^2 + 0,06 A_{Ok} \tau_{\phi\pi} - 3,7 \cdot 10^{-4} A_{Ok} \tau_{\phi\pi}^2 - 2,6 \cdot 10^{-4} A_{Ok}^2 \tau_{\phi\pi} + \\
&+ 3,3 \cdot 10^{-6} A_{Ok}^2 \tau_{\phi\pi}^2; \quad (2.25)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
O_{50}^{90} \begin{matrix} (0 \leq \tau \leq 50) \\ (50 < A_{Ok} \leq 100) \end{matrix} &= 142,5 - 7,4 D_{Ok} + 0,07 D_{Ok}^2 + 10,2 A_{Ok} - 0,06 A_{Ok}^2 - 29,3 \tau_{\phi\pi} + \\
&+ 0,35 \tau_{\phi\pi}^2 - 0,31 D_{Ok} A_{Ok} + 1,8 \cdot 10^{-3} D_{Ok} A_{Ok}^2 + 2,1 \cdot 10^{-3} D_{Ok}^2 A_{Ok} - 1,2 \cdot 10^{-5} D_{Ok}^2 A_{Ok}^2 + \\
&+ 1,05 D_{Ok} \tau_{\phi\pi} - 0,013 D_{Ok} \tau_{\phi\pi}^2 - 7,8 \cdot 10^{-3} D_{Ok}^2 \tau_{\phi\pi} + 9,4 \cdot 10^{-5} D_{Ok}^2 \tau_{\phi\pi}^2 + 0,05 A_{Ok} \tau_{\phi\pi} - \\
&- 8,4 \cdot 10^{-4} A_{Ok} \tau_{\phi\pi}^2 - 3,1 \cdot 10^{-4} A_{Ok}^2 \tau_{\phi\pi} + 6,8 \cdot 10^{-6} A_{Ok}^2 \tau_{\phi\pi}^2; \quad (2.26)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
O_{OK}^{90}_{50} (66,7 \leq \tau \leq 100) = & 744 - 15,3 D_{OK} + 0,1 D_{OK}^2 - 20,2 A_{OK} + 0,14 A_{OK}^2 - 8,2 \tau_{\text{фп}} + 0,05 \tau_{\text{фп}}^2 + \\
& + 0,35 D_{OK} A_{OK} - 2 \cdot 10^{-3} D_{OK} A_{OK}^2 - 2,5 \cdot 10^{-3} D_{OK}^2 A_{OK} + 1,4 \cdot 10^{-5} D_{OK}^2 A_{OK}^2 + \\
& + 0,07 D_{OK} \tau_{\text{фп}} - 3,3 \cdot 10^{-4} D_{OK} \tau_{\text{фп}}^2 - 2,9 \cdot 10^{-4} D_{OK}^2 \tau_{\text{фп}} + 7,8 \cdot 10^{-7} D_{OK}^2 \tau_{\text{фп}}^2 + \\
& + 0,3 A_{OK} \tau_{\text{фп}} - 1,5 \cdot 10^{-3} A_{OK} \tau_{\text{фп}}^2 - 1,9 \cdot 10^{-3} A_{OK}^2 \tau_{\text{фп}} + 1,2 \cdot 10^{-5} A_{OK}^2 \tau_{\text{фп}}^2. \quad (2.27)
\end{aligned}$$

Увеличение доли окатышей в шихте от 0,1 до 0,5% при расположении их в нижней части бункера БЗУ сопровождалось повышением содержания их в первой порции, сформированной по ходу выпуска согласно рисунку 2.10, А [441]. Загрузка 25-30% окатышей от расхода ЖРС обеспечивало формирование первой порции на 92-94% из окатышей и 6-8% из агломерата (рисунки 2.11, А, 2.12, А). При их доле 0,38 содержание окатышей в порции, сформированной после 16,7% времени от общей продолжительности выпуска, составляло 97% при незначительном содержании агломерата (рисунок 2.13, А). Выпуск шихты, состоящей на 70-90% из окатышей, из бункера БЗУ обеспечивает их содержание в первой порции, равное 99%.

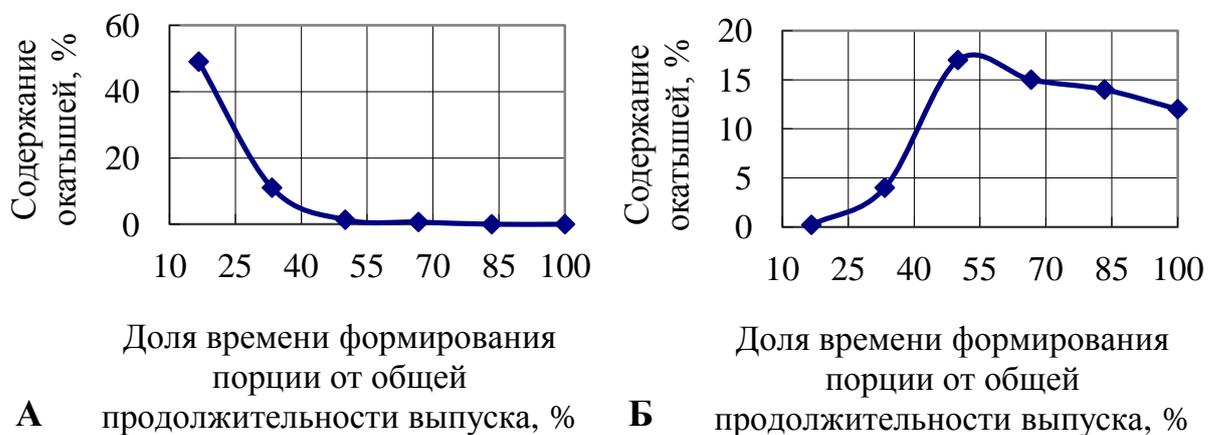


Рисунок 2.9 – Содержание окатышей по мере истечения их совместно железорудными материалами из шихтового бункера БЗУ

при доле окатышей 10% и загрузке их в бункер под (А) и над (Б) агломератом

Поскольку в условиях ПАО «ММК» материалы объемом, составляющим один скип, поступают в колошниковое пространство печи из бункера БЗУ с трех станций углового положения лотка, то отношение количества окатышей к

количеству железорудного сырья в трех кольцевых зонах колошника в направлении движения лотка при их доле в шихте 30% будет следующее: 0,71; 0,15 и 0,04.

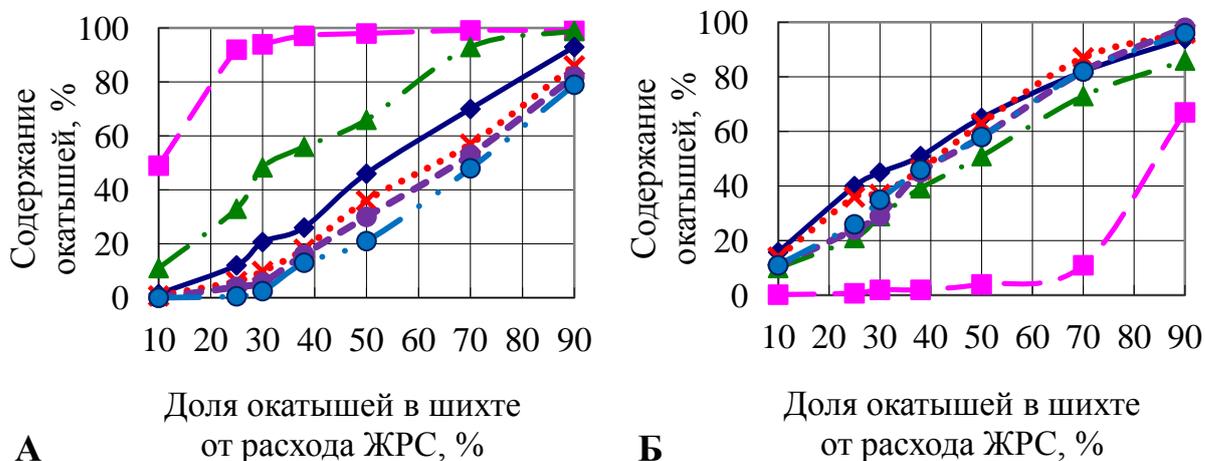


Рисунок 2.10 – Влияние доли окатышей в шихте на содержание их в порциях, отобранных после 16,7 (—■—), 33 (—▲—), 50 (—◆—), 66,7 (—✕—), 83,3 (—◆—) и 100% (—◆—) времени от общей продолжительности выпуска их совместно с агломератом в колошниковое пространство при загрузке окатышей в бункер перед агломератом (А) и после него (Б)

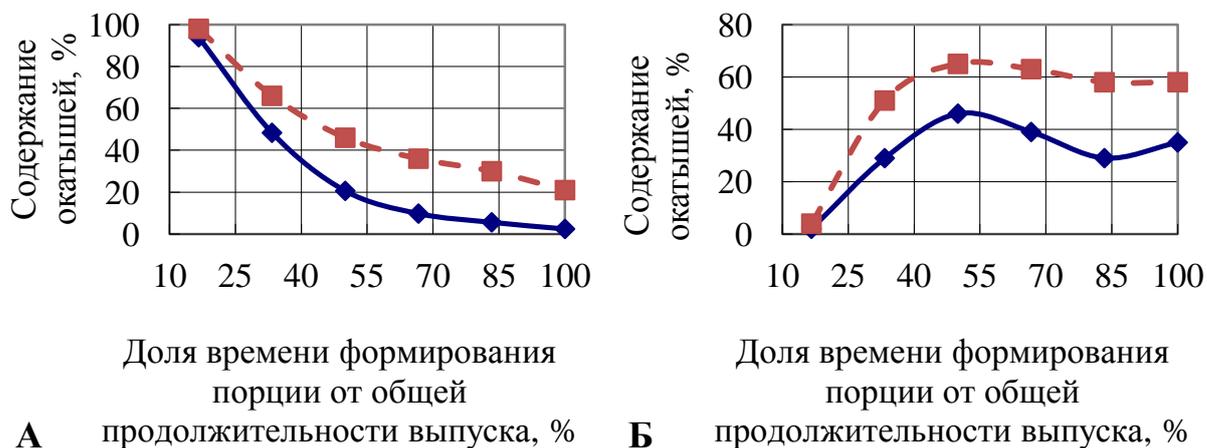
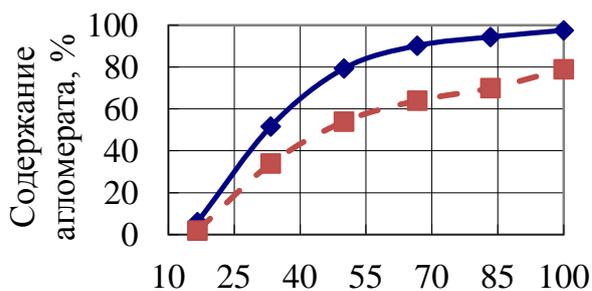
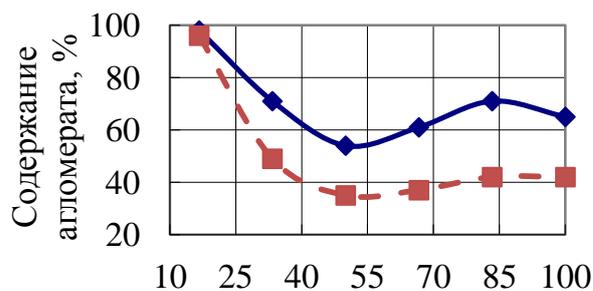


Рисунок 2.11 – Содержание окатышей по мере истечения их совместно с железорудными материалами из шихтового бункера БЗУ при загрузке в бункер 30 (—◆—) и 50% (—■—) от расхода ЖРС под агломератом (А) и над ним (Б)

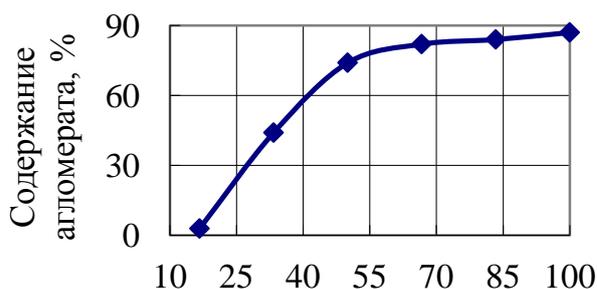


Доля времени формирования порции от общей продолжительности выпуска, %  
**А**

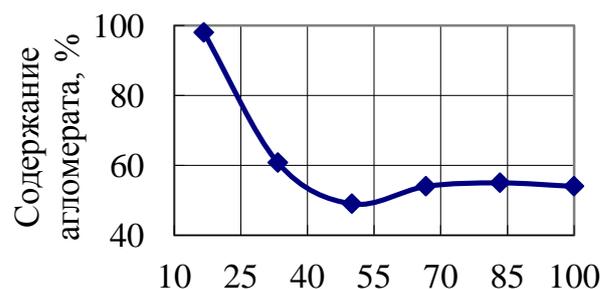


Доля времени формирования порции от общей продолжительности выпуска, %  
**Б**

Рисунок 2.12 – Содержание агломерата по мере истечения его совместно с железорудными материалами из шихтового бункера БЗУ при загрузке в бункер 30 (—◆—) и 50% (—■—) окатышей от расхода ЖРС под агломератом (А) и над ним (Б)



Доля времени формирования порции от общей продолжительности выпуска, %  
**А**



Доля времени формирования порции от общей продолжительности выпуска, %  
**Б**

Рисунок 2.13 – Содержание агломерата по мере истечения его совместно с окатышами, содержание которых составляло 38% от ЖРС, из шихтового бункера БЗУ при загрузке его в бункер после (А) и перед (Б) окатышами

Таким образом, при направлении движения лотка от периферии к центру пристеночная зона печи будет формироваться из смеси агломерата и окатышей соответственно в процентном соотношении в среднем 71 к 29. При этом в некоторых локальных зонах доля окатышей будет превышать 90-95%. В зону рудного гребня будет поступать преимущественно агломерат. Сохранение режима загрузки – окатыши на дно бункера БЗУ при использовании в составе

шихты неофлюсованных окатышей и доведении их доли до 40-50% от расхода ЖРС будет препятствовать образованию гарнисажа на стенках доменной печи и способствовать истиранию кладки шахты и распара. В связи с этим практическая ценность такого режима загрузки с использованием в составе шихты высокой доли неофлюсованных окатышей будет при работе печи с настылью в шахте печи.

Показатель равномерности поступления окатышей из бункера в колошниковое пространство, рассчитанный по формуле (2.2), зависит от расхода окатышей (таблица 2.7) [442]. Особенно это проявляется при загрузке их вниз бункера БЗУ под агломератом согласно уравнению ( $R^2=0,90$ ):

$$K_{OK} = -1,03 + 0,06Ш_{OK} + 0,03Д_{OK} - 8,7 \cdot 10^{-4} Ш_{OK}^2 - 4,5 \cdot 10^{-4} Ш_{OK}Д_{OK} + 2,9 \cdot 10^{-8} Ш_{OK}^2 Д_{OK}^2 + 4,22 \cdot 10^{-6} Ш_{OK}^3 - 1,3 \cdot 10^{-6} Д_{OK}^3, \quad (2.28)$$

где  $Ш_{OK}$  – доля шихты от ее расхода за исключением окатышей, располагающаяся под окатышами в шихтовом бункере БЗУ (0-100), %;

$Д_{OK}$  – доля окатышей в шихте (10-90%) от расхода железорудного сырья.

Таблица 2.7 – Корреляционная матрица (расшифровка в пункте 2.1.2 «Регрессионный и канонический анализы»)

Переменные	$Ш_{OK}$	$A_{ДОБ}$	$Д_{OK}$	$Д_{ДОБ}$	$K_A$	$K_{OK}$	$K_{OP}$	$K_{Pr}$
$Ш_{OK}$	1,000	0,411	-0,014	-0,006	0,048	0,430	0,073	-0,191
$A_{ДОБ}$	0,411	1,000	0,028	-0,006	-0,082	0,140	0,485	0,178
$Д_{OK}$	-0,014	0,028	1,000	0,211	-0,765	0,583	-0,120	-0,078
$Д_{ДОБ}$	-0,006	-0,006	0,211	1,000	-0,232	0,055	0,049	0,053
$K_A$	0,048	-0,082	-0,765	-0,232	1,000	-0,202	-0,023	-0,004
$K_{OK}$	0,430	0,140	0,583	0,055	-0,202	1,000	-0,048	-0,007
$K_{OP}$	0,073	0,485	-0,120	0,049	-0,023	-0,048	1,000	0,557
$K_{Pr}$	-0,191	0,178	-0,078	0,053	-0,004	-0,007	0,557	1,000

При доле окатышей, равной 0,1, и размещении их в бункере БЗУ под агломератом величина коэффициента равномерности поступления окатышей согласно рисунку 2.14 составляла (-0,70), что свидетельствует о неравномерном их поступлении из бункера в колошниковое пространство печи. Поскольку содержание агломерата в шихте в этом случае составляет 90%, равномерность его поступления была выше, чем у окатышей. Показатель равномерности поступления агломерата составляет 0,78 (рисунок 2.15). Увеличение доли окатышей в составе шихты от 0,1 до 0,9 сопровождалось повышением величины показателя равномерности у окатышей от -0,70 до 0,91 и снижением у агломерата от 0,78 до 0,21. При этом в целом для железорудного сырья величина показателя равномерности увеличилась от 0,04 до 0,56 (рисунок 2.16).

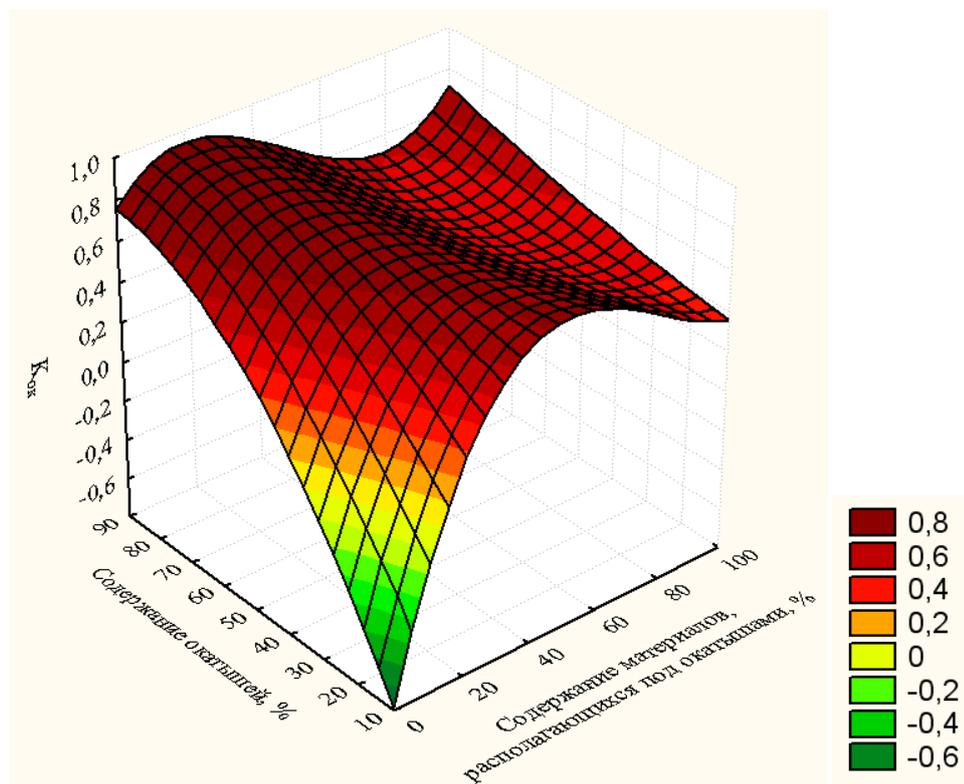


Рисунок 2.14 – Зависимость показателя равномерности поступления окатышей в колошниковое пространство печи от их доли в железорудной части шихты и расположения в слое агломерата

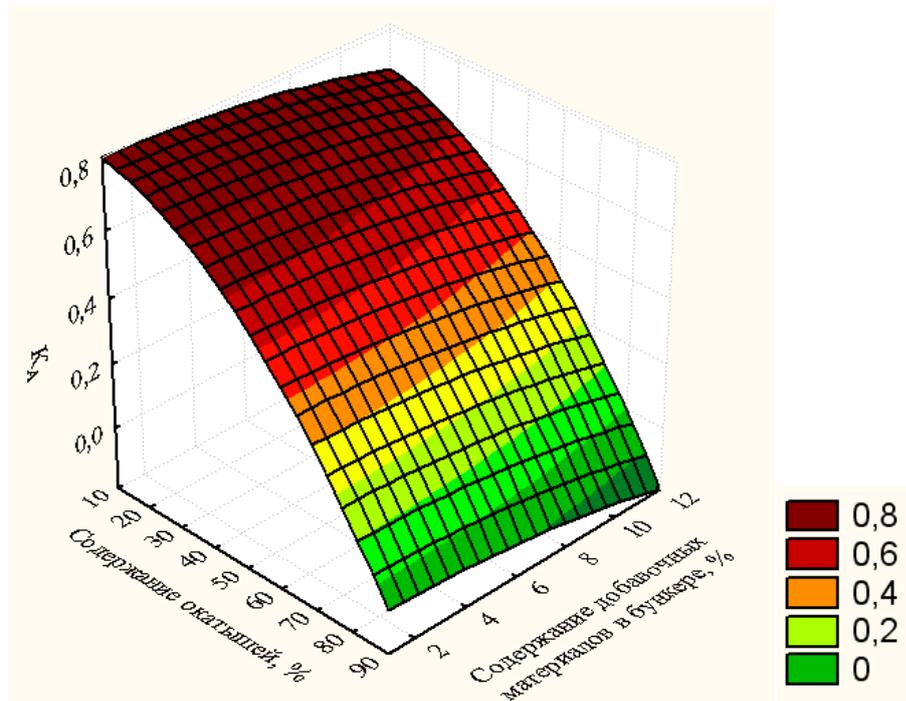


Рисунок 2.15 – Зависимость показателя равномерности поступления агломерата в колошниковое пространство печи от доли окатышей в железорудной части шихты и расхода добавочных материалов

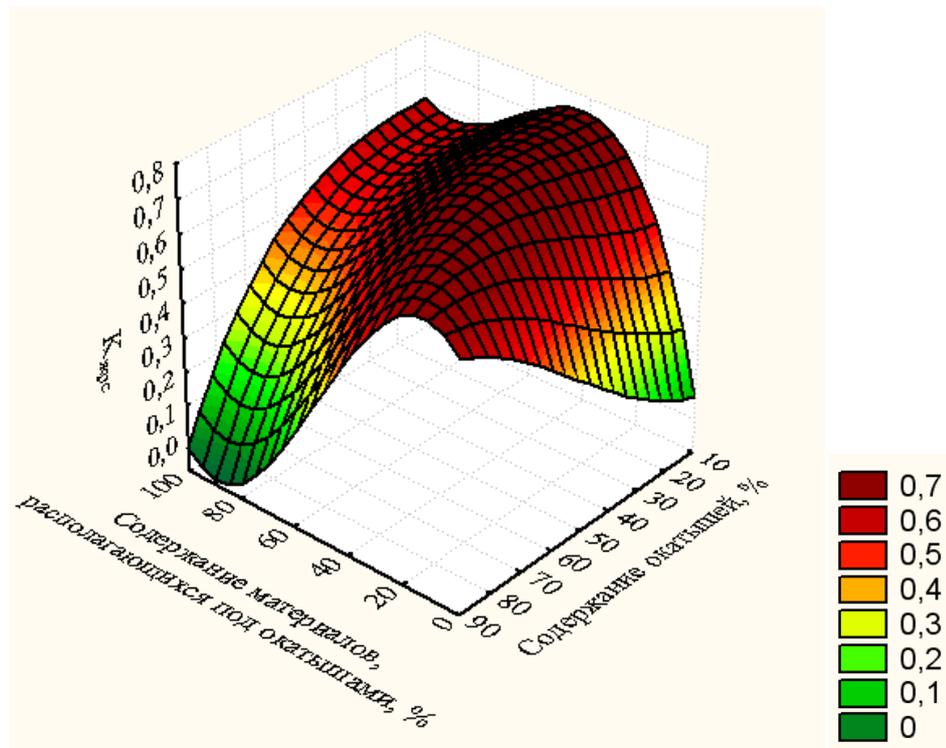


Рисунок 2.16 – Зависимость показателя равномерности поступления железорудных материалов в колошниковое пространство печи от доли окатышей и расположения их в слое агломерата

Отдаление окатышей от выпускного отверстия путем размещения их в бункере БЗУ над агломератом изменяло очередность поступления материалов из бункера в колошниковое пространство печи. При содержании окатышей в шихте 10% характер выпуска их из бункера представлен на рисунке 2.9, Б. В первой порции их не было. По истечении 33% времени от общей продолжительности выпуска содержание окатышей составляет 6%, хотя окатыши перед выпуском находились на поверхности агломерата. Максимальное их содержание достигалось по истечении 50% времени от общей продолжительности выпуска и составляло 17%. После чего их доля в формируемых порциях уменьшалась [440].

Рост содержания окатышей в шихте от 10 до 50% не изменял характер выпуска железорудных материалов (таблица 2.8, рисунки 2.11 и 2.12) при повышении абсолютных величин их доли от массы формируемой порции. Минимальный рост доли окатышей наблюдали в порции, формируемой после 16,7% времени после начала выпуска. При доле окатышей, равной 0,5, содержание их составляло 4% (см. рисунок 2.10, Б и таблицу 2.8). В остальных порциях разность между максимальными и минимальными величинами колебалась от 10 до 17% абс. (см. рисунок 2.11, Б).

Таблица 2.8 – Содержание окатышей по ходу выпуска железорудных материалов в колошниковое пространство печи при расположении различной доли окатышей в бункере над агломератом

Содержание окатышей от ЖРС, %	Содержание окатышей, %, по ходу выпуска материалов из бункера (% от общей продолжительности выпуска)					
	16,7	33,3	50,0	66,7	83,3	100,0
10	0	6	<b>17</b>	14	10	12
25	1	26	<b>40</b>	36	24	26
30	2	29	<b>46</b>	39	29	35
38	2	39	<b>51</b>	46	45	46
50	4	51	<b>65</b>	63	58	58
70	5	73	83	<b>90</b>	85	85
90	55	89	<b>99</b>	<b>99</b>	<b>99</b>	96

Дальнейшее увеличение расхода окатышей с 50 до 90% сопровождалось перемещением максимума согласно таблице 2.8 (выделено красным цветом и жирным шрифтом).

При доле окатышей, равной 0,7 от расхода железорудного сырья, максимальное их содержание наблюдали после 66,7% времени от продолжительности выпуска. Когда содержание окатышей достигало 90%, экстремума не наблюдалось. В порциях, сформированных после 50% времени от начала выпуска, содержание окатышей превышало 96%.

Таким образом, выпуск компонентов шихты в колошниковое пространство печи с трех станций углового положения лотка при расположении окатышей в бункере БЗУ над агломератом обеспечивало максимальное их поступление со второй станции углового положения лотка в середине выпуска. При содержании окатышей 30% от расхода ЖРС отношение их массы к железорудному сырью при выпуске с трех кольцевых зон колошника составит 0,16; 0,43; 0,32. Увеличению доли окатышей от 30 до 50% соответствует рост их доли по кольцевым зонам колошника в направлении движения лотка соответственно от 0,16; 0,43; 0,32 до 0,28; 0,64 и 0,58. Такой режим целесообразен для уменьшения контакта окатышей с футеровкой доменной печи, что предотвратит излишнее разрушение кладки при использовании неофлюсованных окатышей с долей выше 40% от расхода железорудного сырья. Рациональный выбор станций углового положения лотка обеспечит поступление максимального количества окатышей в зону рудного гребня и исключит попадание их в центр печи.

Показатель равномерности поступления агломерата по массе из бункера в колошниковое пространство печи зависит от расхода окатышей и добавочных материалов (см. таблицу 2.7). Наиболее полно влияние исследуемых регрессоров на результативный признак описывает линейная по параметрам нелинейная модель, полученная методом Гаусса-Ньютона ( $R^2=0,6$ ):

$$K_A = 0,82 - 1,1 \cdot 10^{-4} D_{OK}^2 - 9,2 \cdot 10^{-4} D_{ДОБ}^2, \quad (2.29)$$

где  $D_{OK}$  – доля окатышей в шихте (10-90%) от расхода железорудного сырья;

$D_{ДОБ}$  – расход добавочных материалов (0–16,3 кг).

Регрессионный анализ (таблица 2.9) и гистограммы остатков от регрессии (рисунок 2.17) подтверждают адекватность модели, которая свидетельствует, что при увеличении расхода окатышей и добавочных материалов равномерность поступления агломерата из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи ухудшается.

Таблица 2.9 – Регрессионный анализ нелинейной модели

$$K_{OK} = b_0 + b_1 D_{OK}^2 + b_2 D_{ДОБ}^2$$

Параметры модели	Оценки параметров	$t$ – критерий Стьюдента	$p$ -уровень	Стандартная ошибка	$F$ -критерий Фишера
$b_0$	0,824	27,3	0,00	0,00	89,2
$b_1$	-0,00011	-13,2	0,00	0,00	
$b_2$	-0,00092	-2,1	0,00	0,04	

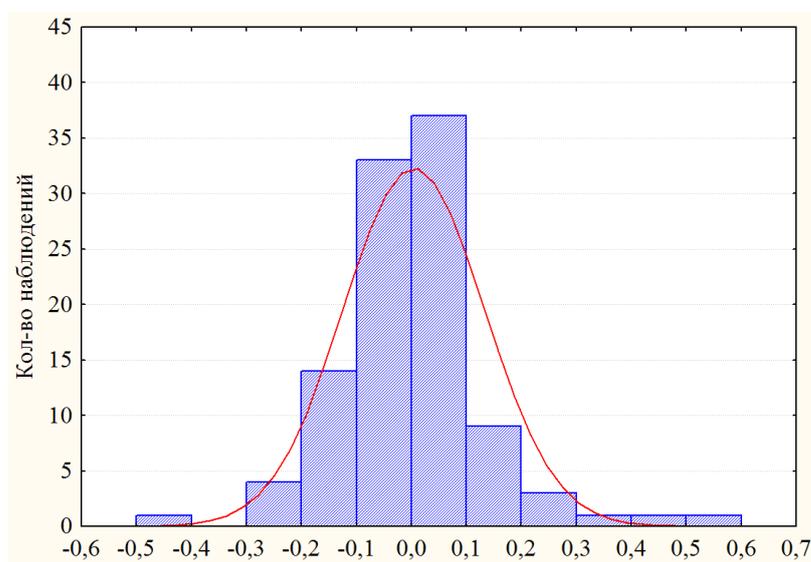


Рисунок 2.17 – Гистограмма остатков для модели 2.31

Анализ результатов моделирования режимов загрузки, предполагающих размещение агломерата под окатышами и над ними, показал следующее. При увеличении доли окатышей от 0,3 до 0,5 показатель равномерности

поступления агломерата из бункера БЗУ на колошник уменьшался интенсивнее при размещении агломерата внизу бункера БЗУ по сравнению с режимом загрузки окатышей в нижней его части. В условиях размещения агломерата в нижней части бункера БЗУ, после чего окатышей уменьшение доли агломерата от 0,7 до 0,5 сопровождалось уменьшением показателя равномерности агломерата от 0,78 до 0,54. То есть величина показателя уменьшилась на 31,1% абс. против снижения на 10,2% при загрузке окатышей вниз бункера БЗУ под агломератом. Несмотря на это, абсолютная величина показателя равномерности поступления агломерата осталась выше при загрузке агломерата вниз бункера БЗУ по сравнению с режимом загрузки, предполагающим расположение их в бункере над окатышами. В результате при загрузке агломерата в бункер БЗУ первым, после чего окатыши при их доле от железорудной части шихты, равной 0,3 и 0,5, показатель равномерности поступления железорудного сырья из бункера в колошниковое пространство составлял соответственно 0,64 и 0,54, что выше, по сравнению с режимом загрузки окатышей вниз бункера БЗУ, после чего агломерат в соответствии с рисунком 2.16.

При выпуске в эллипсоидах разрыхления шихта находится в разрыхленном состоянии. Материал с более высокой насыпной плотностью стремится первым покинуть бункер. Насыпная плотность окатышей больше, чем у агломерата, поэтому при их размещении внизу шихтового бункера они не позволяют вытеснять себя агломерату. Поэтому расположение агломерата после окатышей ухудшает равномерность их поступления по ходу выпуска. И, наоборот, при расположении агломерата в нижней части бункера БЗУ позволяет окатышам проникать в разрыхленный слой агломерата, тем самым обеспечивать совместный их выпуск и более высокую величину показателя равномерности. Увеличение массы окатышей при одновременном сокращении массы агломерата увеличивает действие вытеснения одного материала другим, тем самым обеспечивая более интенсивное уменьшение показателя равномерности при загрузке окатышей в бункер после агломерата по сравнению с загрузкой их в бункер первыми.

Наиболее равномерно окатыши и агломерат поступают из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи при размещении окатышей в слое агломерата (см. рисунок 2.16). Так, загрузка 30-38% окатышей от ЖРС в середину слоя агломерата, а также между порциями, сформированными из него, в количестве 25 и 75% от массы агломерата, расположенными в бункере БЗУ соответственно под и над окатышами, обеспечивала максимальные величины показателя равномерности железорудных материалов  $K_{ЖРС}$ , превышающие 0,75 (уравнение (2.30),  $R^2 = 0,87$ , рисунок 2.18) [443].

$$K_{ЖРС} = 0,05 + 0,04Ш_{ОК} - 6,8 \cdot 10^{-4} Ш_{ОК}^2 + 1,7 \cdot 10^{-4} Д_{ОК}^2 - 3,45 \cdot 10^{-6} Ш_{ОК} Д_{ОК}^2 + 1,96 \cdot 10^{-8} Ш_{ОК}^2 Д_{ОК}^2 + 3,44 \cdot 10^{-6} Д_{ОК}^3 - 1,11 \cdot 10^{-6} Ш_{ОК}^3, \quad (2.30)$$

где  $Ш_{ОК}$  – доля шихты от ее расхода за исключением окатышей, располагающаяся под окатышами в шихтовом бункере БЗУ (0-100), %;

$Д_{ОК}$  – доля окатышей в шихте (10-90%) от расхода железорудного сырья.

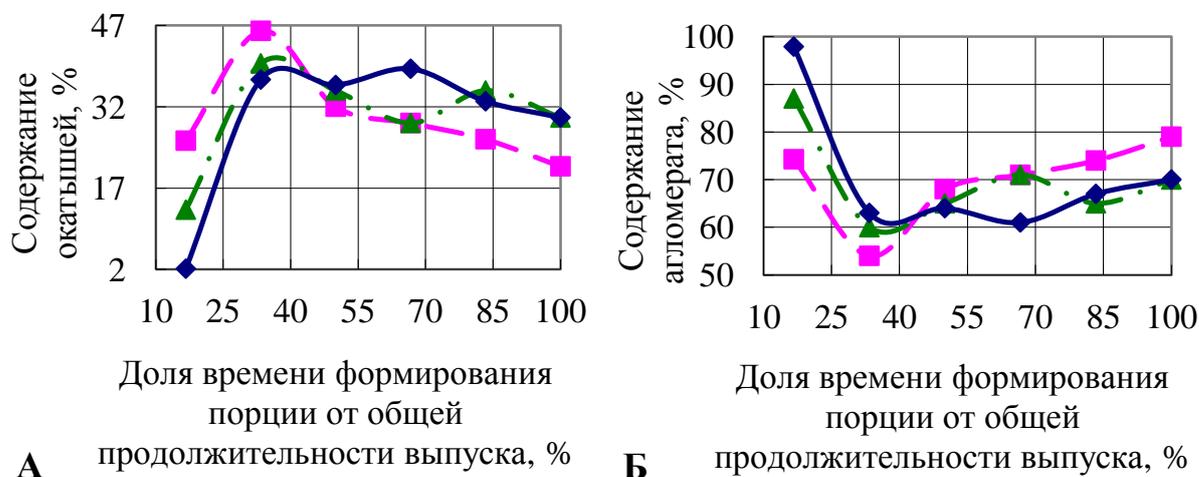


Рисунок 2.18 – Содержание окатышей (А) и агломерата (Б) по мере их совместного истечения из шихтового бункера БЗУ при загрузке в него 30% окатышей от расхода ЖРС в середину слоя агломерата (—▲—) и порциями, сформированными из него, в количестве 25 и 75% (—■—), 75 и 25% от массы агломерата (—◆—), расположенными в бункере БЗУ соответственно под и над окатышами

Выпуск компонентов шихты из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи при размещении окатышей в бункере между порциями агломерата, сформированными из 25 и 75% от его массы, расположенными в бункере соответственно под и над окатышами, обеспечивает экстремум во второй порции, формируемой по истечении 33,3% времени от продолжительности выпуска. При доле окатышей 0,3 от расхода железорудного сырья в первой порции их содержание составляло 26% от массы порции, во второй – увеличивалось до 46%. Затем содержание окатышей в формируемых порциях уменьшалось и в конце выпуска составляло 21% (см. рисунок 2.18).

Отдаление окатышей от выпускного отверстия путем размещения их в середине слоя агломерата и порциями, сформированными из него, в количестве 75 и 25% от массы агломерата, расположенными в бункере соответственно под и над окатышами, уменьшает содержание окатышей в первой порции, формируемой по истечении 16,7% времени после начала выпуска. Это обеспечивает снижение величины показателя равномерности поступления окатышей из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи согласно рисунку 2.14 от 0,71 при размещении 30% окатышей между порций агломерата, сформированными в количестве 25 и 75% от массы агломерата, расположенными в бункере соответственно под и над окатышами, до 0,69 при размещении окатышей в середине слоя агломерата и 0,53 в условиях их расположения в бункере между порциями агломерата, сформированными в количестве 75 и 25% от его массы, расположенными в бункере соответственно под и над окатышами.

При выпуске железорудных материалов из бункера БЗУ в доменную печь в условиях размещения 30% окатышей между порций агломерата, сформированными в количестве 25 и 75% от его массы, расположенными в бункере соответственно под и над окатышами, распределение отношения массы окатышей к железорудному сырью с трех станций углового положения лотка в направлении его движения составит: 0,36; 0,31; 0,24. Из этого следует, что при выгрузке материалов на станции углового положения лотка № 6-8 целесообразно

осуществлять движение лотка от периферии к центру с целью увеличения их доли в зоне рудного гребня и уменьшения в осевой зоне. При размещении окатышей в середине слоя агломерата распределение отношения массы окатышей к железорудному сырью с трех станций углового положения лотка в направлении его движения составит: 0,27; 0,32; 0,33. Расположение окатышей между порций агломерата, сформированными в количестве 75 и 25% от его массы, расположенными в бункере соответственно под и над окатышами, обеспечивает максимальное их поступление с промежуточной станции, в количестве 38%. С первой и последней стаций их доля составит соответственно 0,20 и 0,32.

Таким образом, регулированием последовательности загрузки железорудных материалов в бункер БЗУ совместно с направлением движения лотка от периферии к центру или наоборот можно обеспечить рациональное отношение окатышей и агломерата в соответствующих зонах колошника по радиусу и обеспечить равномерное их распределение по окружности печи, как по виду, так и по крупности.

В направлении повышения равномерности распределения материалов по ходу выпуска компонентов шихты из него в колошниковое пространство печи действовало увеличение угла открытия шихтового затвора при расположении окатышей в бункере БЗУ над агломератом. При повышении угла от 35 до 60° возрастал объемный расход материалов более чем в два раза – от 0,23 до 0,53 дм<sup>3</sup>/с. Ускоренное истечение компонентов шихты действовало в направлении уменьшения проникновения окатышей в нижележащий слой агломерата. Это обеспечило снижение содержания окатышей в порциях, формируемых по ходу выпуска материалов в течение 66,7% времени от его начала и увеличение в оставшихся, перераспределение железорудного сырья по ходу выпуска сопровождалось повышением величины показателя равномерности агломерата и окатышей от 0,55 до 0,62 (таблица 2.10).

Таблица 2.10 – Содержание окатышей по ходу выпуска железорудных материалов в колошниковое пространство печи при расположении 25% окатышей от расхода ЖРС в бункере над агломератом

Угол открытия шихтового затвора, град	Содержание окатышей, %, по ходу выпуска материалов из бункера (% от общей продолжительности выпуска)						$K_{ЖРС}$
	16,7	33,3	50,0	66,7	83,3	100,0	
35	1	26	51	35	19	19	0,55
40	1	23	51	34	21	21	0,56
45	1	20	45	33	23	28	0,61
50	1	20	44	31	23	28	0,62
55	1	19	42	30	23	33	0,62
60	1	18	41	30	24	34	0,62

### 2.2.2.2 Двухскиповое заполнение шихтового бункера

Загрузку двух скипов в бункер БЗУ доменных печей можно осуществлять в различных вариантах. Последовательность расположения компонентов шихты в бункере можно обеспечивать по подобию односкиповой загрузки, например, размещать окатыши в нижней части бункера, после чего агломерат или наоборот. Располагать окатыши в слое агломерата. Либо обеспечивать, чтобы очередность загрузки компонентов шихты во второй скип дублировала первый. В результате в бункере компоненты шихты будут чередоваться. Например, при загрузке окатышей на дно бункера БЗУ их размещение снизу вверх будет следующим: окатыши, после чего агломерат первого скипа, затем окатыши и агломерат второго скипа. В связи с этим смоделировали различные режимы загрузки двух скипов железорудных материалов в бункер БЗУ и сравнили результаты с режимами загрузки компонентов шихты, предполагающими размещение в бункере одного скипа.

При загрузке в бункер БЗУ двух скипов с долей окатышей 0,3 от расхода железорудной части шихты и размещении их под агломератом, над ним и в слое между порциями агломерата в количестве 25:75, 50:50 и 75:25%,

расположенными в бункере БЗУ соответственно под и над окатышами, последовательность поступления компонентов шихты из бункера в процессе выпуска была схожа с соответствующими режимами односкиповой загрузки (рисунок 2.19).

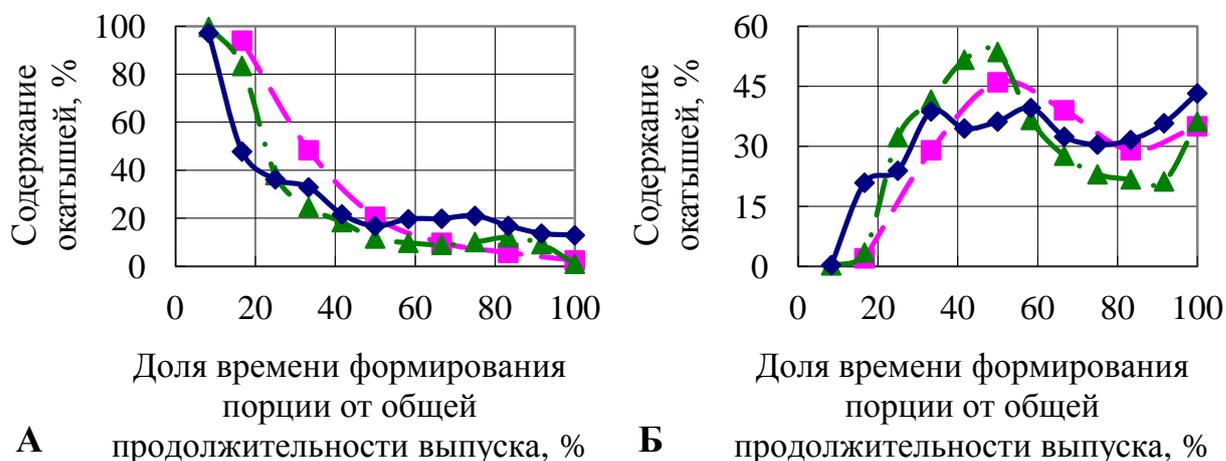


Рисунок 2.19 – Содержание окатышей по мере их истечения в составе железорудных материалов из шихтового бункера БЗУ при их доле 30% от расхода ЖРС и размещении окатышей под агломератом (А) и над ним (Б) в условиях загрузки в бункер одного скипа (—■—), двух (—▲—) и двух скипов с дублированием очередности загрузки материалов во втором скипе первому (—◆—)

При расположении окатышей в нижней части бункера БЗУ максимальное их количество при выпуске наблюдали в начале выпуска и минимальное в конце (рисунок 2.19, А). Размещение их после агломерата обеспечивало максимум по их содержанию в порции, сформированной по истечении 50% времени от начала выпуска (рисунок 2.19, Б). Загрузка окатышей в слой агломерата обеспечивала наиболее равномерное их поступление из бункера в колошниковое пространство печи (рисунок 2.20).

Увеличение количества скипов при сохранении очередности загрузки снижает показатель равномерности поступления окатышей из бункера БЗУ в среднем от 0,46 до 0,39 (таблица 2.11). Особенно ухудшение равномерности наблюдается при размещении окатышей в слое агломерата и над ним. Это объясняется отдалением окатышей от выпускного отверстия за счет увеличения количества агломерата под ними. В исследованиях, проводимых с углом

открытия шихтового затвора  $50^\circ$  при содержании окатышей от расхода ЖРС 30%, показатель равномерности железорудного сырья в среднем для различных режимов загрузки уменьшился от 0,62 до 0,57 (таблица 2.11). Аналогичные результаты получили при различной наполняемости бункера БЗУ и угле открытия шихтового затвора  $31,5^\circ$ . Увеличение количества скипов, загружаемых в бункер, от 0,75 до 2 сопровождалось уменьшением показателя равномерности железорудных материалов от 0,66 до 0,60 (таблица 2.12). При этом характер выпуска не изменялся (рисунок 2.21). Максимальное количество окатышей наблюдали по иссечению 50-60% времени от длительности выпуска.

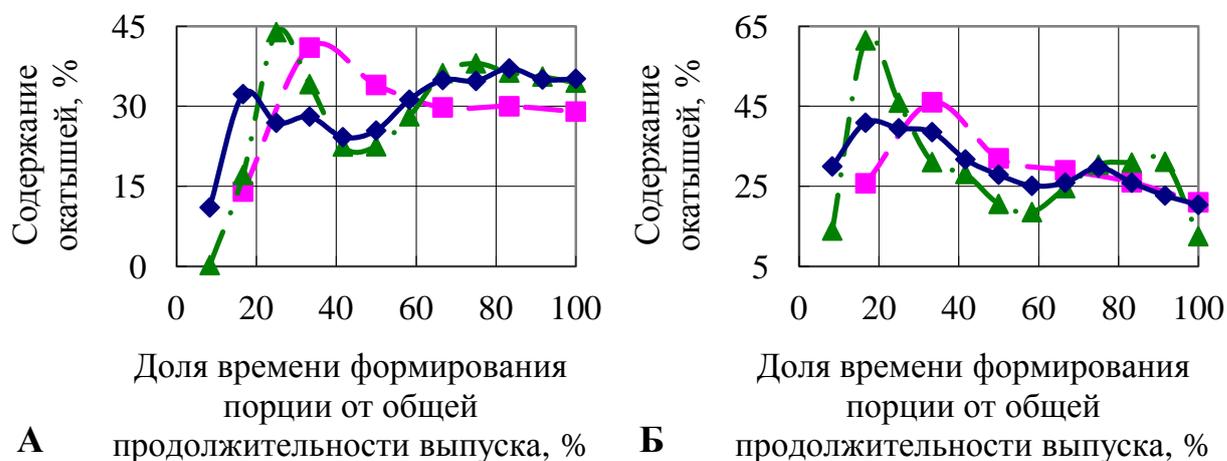


Рисунок 2.20 – Содержание окатышей по мере их истечения в составе железорудных материалов из шихтового бункера БЗУ при их доле 30% от расхода ЖРС и размещении окатышей в середине слоя агломерата (А) и порциями, сформированными из него, в количестве 25 и 75% (Б) в условиях загрузки в бункер одного скипа (—■—), двух (—▲—) и двух скипов с дублированием очередности загрузки материалов во втором скипе первому (—◆—)

Режим двухскиповой загрузки, обеспечивающий размещение материалов во втором скипе, дублирующем последовательность расположения их в первом, обеспечивал наиболее высокий показатель равномерности поступления компонентов шихты из бункера в колошниковое пространство печи (см. таблицу 2.11). Средняя величина показателя равномерности для всех режимов составила 0,72, что выше на 13,9% по сравнению с односкиповой загрузкой.

При этом более чем в два раза его величина увеличивалась при режиме добавки вниз бункера БЗУ. Это объясняется тем, что загрузка двух скипов в бункер обеспечивает одновременное расположение окатышей в нижней части бункера и в слое шихты. В результате при выпуске ее из бункера содержание окатышей в порциях, формируемых во второй половине выпуска, было выше по сравнению с односкиповым режимом загрузки (рисунок 2.20, А).

Таблица 2.11 – Показатели равномерности железорудных материалов при различных режимах загрузки в бункер БЗУ агломерата и окатышей с отношением их в шихте по массе 0,3 к 0,7

Доля агломерата, располагающегося под окатышами в бункере БЗУ, %	Показатель равномерности поступления компонентов шихты из бункера БЗУ в колошниковое пространство, рассчитанный по формуле (2.2)								
	Односкиповая загрузка			Двухскиповая загрузка, при очередности загрузки компонентов шихты					
				в бункер БЗУ по подобию односкиповой загрузке			во второй скип, дублирующей последовательность расположения в первом		
	$K_{Ок}$	$K_A$	$K_{ЖРС}$	$K_{Ок}$	$K_A$	$K_{ЖРС}$	$K_{Ок}$	$K_A$	$K_{ЖРС}$
0	-0,18	0,49	0,16	-0,16	0,56	0,20	0,20	0,66	0,43
25	0,71	0,88	0,80	0,53	0,81	0,67	0,78	0,90	0,84
50	0,70	0,87	0,79	0,59	0,83	0,71	0,76	0,90	0,83
75	0,53	0,80	0,66	0,55	0,83	0,69	0,62	0,85	0,73
100	0,49	0,78	0,64	0,43	0,77	0,60	0,63	0,84	0,73
Среднее	<b>0,46</b>	<b>0,77</b>	<b>0,62</b>	<b>0,39</b>	<b>0,76</b>	<b>0,57</b>	<b>0,61</b>	<b>0,84</b>	<b>0,72</b>

При использовании в составе шихты 40-60% неофлюсованных окатышей целесообразно будет использование двухскипового заполнения бункера БЗУ при размещении окатышей над агломератом. Такая последовательность загрузки при направлении движения лотка от периферии к центру обеспечивала минимальное количество окатышей в первой кольцевой зоне, располагающейся на периферии (рисунок 2.22) [444].

Таблица 2.12 – Показатели равномерности железорудных материалов при различной наполняемости бункера БЗУ агломератом и окатышами с отношением их в шихте по массе 0,3 к 0,7

Количество материалов в бункере БЗУ, скип	Показатель равномерности поступления компонентов шихты из бункера БЗУ в колошниковое пространство, рассчитанный по формуле (2.2)		
	$K_{Ок}$	$K_A$	$K_{ЖРС}$
0,75	0,53	0,79	0,66
1	0,51	0,79	0,65
1,25	0,51	0,79	0,65
1,5	0,48	0,78	0,63
2	0,43	0,77	0,60

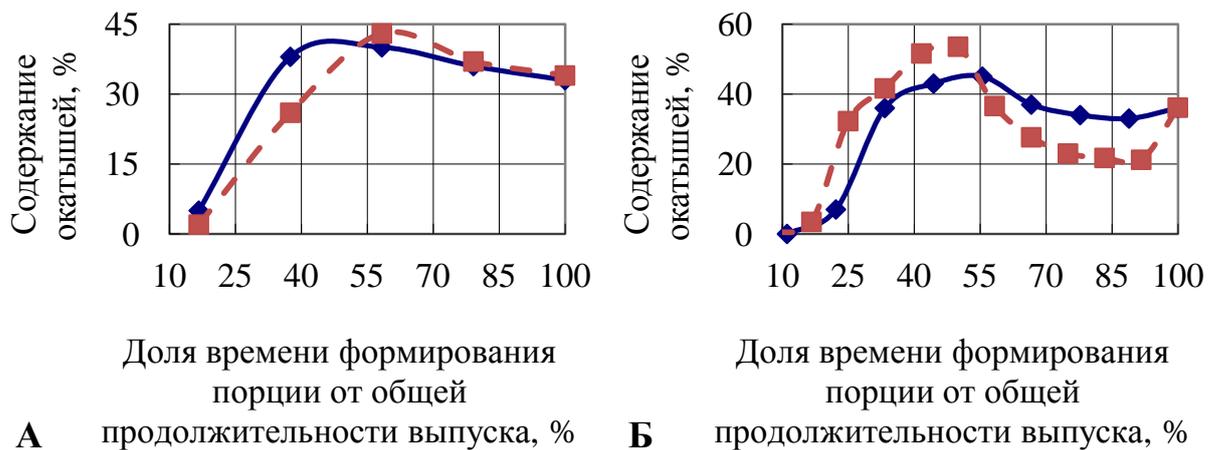
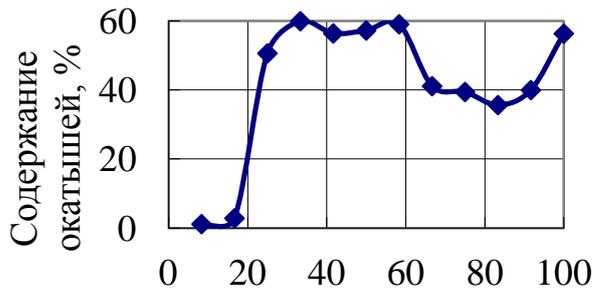


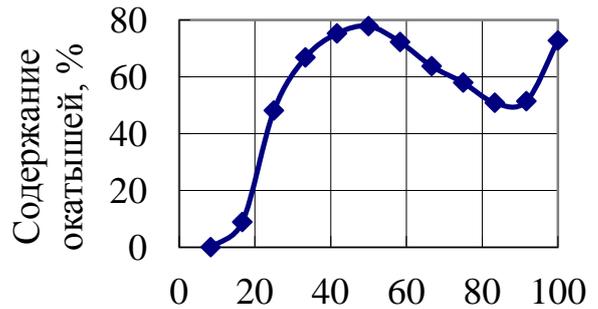
Рисунок 2.21 – Содержание окатышей по мере истечения их в составе железорудных материалов из шихтового бункера БЗУ при загрузке в бункер 0,75 скипа (—◆—, рисунок А), 1 (—■—, рисунок А), 1,5 (—◆—, рисунок Б) и 2 скипа (—■—, рисунок Б)

Согласно рисунку 2.22 при размещении окатышей в количестве 45% от железорудной части шихты над агломератом первые 2 порции были полностью сформированы из одного агломерата. В условиях загрузки окатышей в бункер БЗУ последними с их долей 57,5% от расхода железорудного сырья наблюдали отсутствие окатышей в первой порции и низкую долю, равную 13,6%, во второй порции.



Доля времени формирования порции от общей продолжительности выпуска, %

А



Доля времени формирования порции от общей продолжительности выпуска, %

Б

Рисунок 2.22 – Содержание окатышей, размещённых в верхней части бункера БЗУ, по мере истечения их совместно с агломератом и добавочными материалами: А – загрузка 42,5% окатышей на агломерат; Б – загрузка 57,5% окатышей на агломерат

### 2.2.3 Распределение добавочных материалов по ходу выпуска

При выпуске шихтовых материалов из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи целесообразно обеспечивать равномерное распределение не только агломерата и окатышей, но и добавочных материалов, таких как коксовый орешек и промывочные материалы, в том числе марганцевая и железная руды, кварцит, материалы, формирующие гарнисаж. Кроме того, необходимо обеспечивать поступление их в заданную зону колошника печи по радиусу, например коксовый орешек – в зону рудного гребня, промывочный материал в зону горна с наихудшей дренажной способностью коксовой насадки. Титаномагнетитовая руда наиболее эффективное влияние на тепловые нагрузки горна окажет, если ее равномерно распределять по окружности колошника в пристеночной зоне печи. Для этого необходимо разработать закономерности выпуска добавочных материалов из бункера БЗУ лоткового типа при различных режимах загрузки.

В связи с этим исследовали влияние различных параметров загрузки на очередность поступления добавочных материалов из бункера БЗУ в

колошниковое пространство печи и равномерность их распределения по порциям в процессе выпуска из бункера БЗУ [445-448].

При моделировании режимов загрузки материалов в бункер, предполагающих расположение промывочного материала над коксовым орешком как компонента шихты, обладающего повышенной насыпной плотностью по сравнению с углеродсодержащим материалом при различных вариациях их размещения относительно железорудного сырья, сопровождалось тесной положительной связью между откликами, характеризующими равномерность поступления коксового орешка  $K_{ор}$  и промывочного материала  $K_{пр}$  из бункера БЗУ на лоток по ходу выпуска от входных признаков  $\rho(K_{ор}, K_{пр}) = 0,557$  ( см. таблицу 2.7).

Результаты моделирования показывают, что при расположении орешка и промывочных материалов в нижней части бункера БЗУ в условиях как односкиповой, так и двухскиповой загрузки материалов в бункер БЗУ максимальное их содержание наблюдали в начале выпуска, что обеспечивало низкую величину показателя равномерности их поступления из бункера в колошниковое пространство печи (таблица 2.13). Такой режим загрузки целесообразно использовать при наличии в шихте материалов, формирующих гарнисаж. Расположение титаномагнетитовой руды в нижней части бункера БЗУ в условиях как односкипового, так и двухскипового набора материалов в бункер БЗУ обеспечивало максимальное ее содержание в начале выпуска. Движение лотка при этом от периферии к центру позволило размещать руду в пристеночной зоне печи, что позволит эффективно формировать защитный слой гарнисажа.

Для равномерного поступления добавочных материалов из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи коксовый орешек и промывку, так же как и окатыши, целесообразно загружать в слой железорудных материалов (рисунки 2.23-2.25). При этом параметр, характеризующий расход добавочных материалов, не имел значительного действия на рациональное размещение их в бункере БЗУ. Это объясняется малым их содержанием в формируемой порции

шихты в бункере БЗУ, который не превышает 6 % по отношению к сырью, загружаемому в бункер [445, 446].

Таблица 2.13 – Показатель равномерности поступления добавочных материалов из бункера БЗУ на лоток при различных режимах их загрузки

Доля шихты, располагающейся под добавочными материалами в бункере БЗУ, %	Показатель равномерности поступления компонентов шихты из бункера БЗУ в колошниковое пространство, рассчитанный по формуле (2.2)					
	Односкиповая загрузка		Двухскиповая загрузка, при очередности загрузки компонентов шихты			
			в бункер БЗУ по подобию односкиповой загрузке		во второй скип, дублирующей последовательность расположения в первом <sup>1</sup>	
	$K_{Пр}$	$K_{Ко}$	$K_{Пр}$	$K_{Ко}$	$K_{Пр}$	$K_{Ко}$
0	-1,2	-1,2	-2,3	-2,1	-0,65*	-0,45*
25	0,76	0,72	0,52	0,48	0,73**	0,66**
50	0,77	0,74	0,50	0,44	0,60***	0,49***
75	0,47	0,18	0,37	0,22	-	-
100	0,37	0,13	0,19	0,10		

1 – шихтовые материалы в бункере БЗУ располагали в следующей последовательности:

\* – на дно бункера БЗУ добавочные материалы, следом 50% железорудного сырья от их содержания в бункере, после чего добавки и оставшиеся 50% ЖРС;

\*\* – на дно бункера БЗУ 12,5% ЖРС от их содержания, следом добавочные материалы, затем 50% ЖРС, после чего добавки и оставшиеся 37,5% ЖРС;

\*\*\* – на дно бункера БЗУ 50% ЖРС, следом добавочные материалы, затем 50% ЖРС, после чего добавки

Последовательность загрузки компонентов шихты в бункер БЗУ изменяло характер выпуска промывочных материалов в колошниковое пространство печи. При этом максимальное их количество наблюдали по истечении 30-50% времени формирования порций от общей продолжительности выпуска.

В условиях расположения промывочного материала в слое железорудного сырья, сформированного из кластеров в количестве 25 и 75% от массы железорудных материалов, расположенных в бункере БЗУ соответственно под

и над промывочным материалом, максимум их содержания при выпуске приходится на порции, сформированные по истечении 30% времени после начала выпуска (см. рисунок 2.23). При расположении промывочного материала в слое железорудного сырья, сформированного из кластеров в количестве 75 и 25% от массы железорудных материалов, расположенных в бункере БЗУ соответственно под и над промывочным материалом, максимальное количество промывочного материала наблюдали в порциях, сформированных по истечении 50% времени после начала выпуска. Наряду со сдвигом максимума по истечении во времени изменялось и абсолютное значение максимума. Эти закономерности справедливы как для односкиповой, так и для двускиповой загрузки шихты в бункер БЗУ.

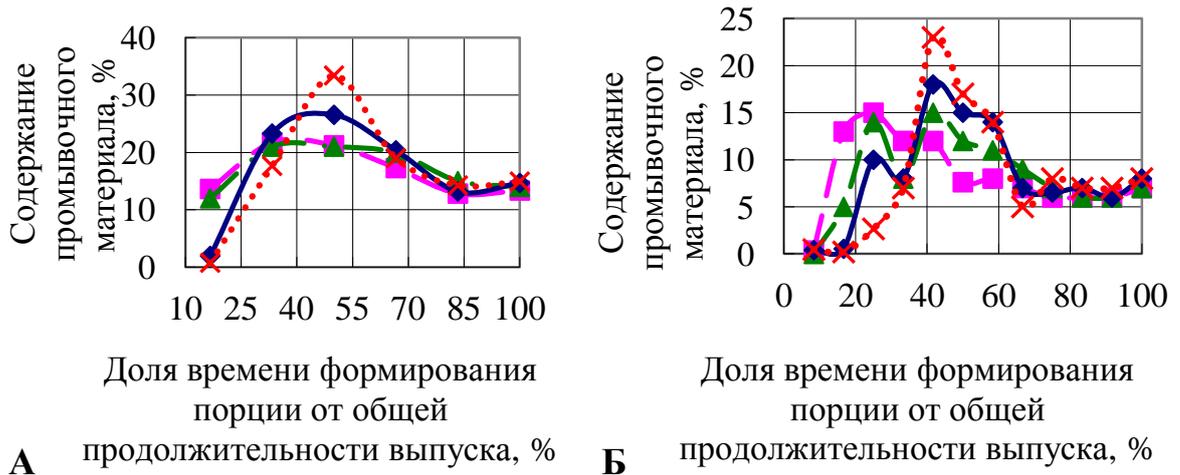


Рисунок 2.23 – Содержание промывочного материала от его расхода по мере истечения в составе железорудных материалов из шихтового бункера БЗУ при размещении его над шихтовыми материалами ( -x- ), в слое железорудного сырья, сформированного из слоев в количестве соответственно 25 и 75% (-■-), 50 и 50% (-▲-), 75 и 25% (-◆-) от массы железорудных материалов, расположенных в бункере БЗУ соответственно под и над промывочным материалом: А – загрузка в бункер БЗУ одного скипа; Б – загрузка в бункер двух скипов

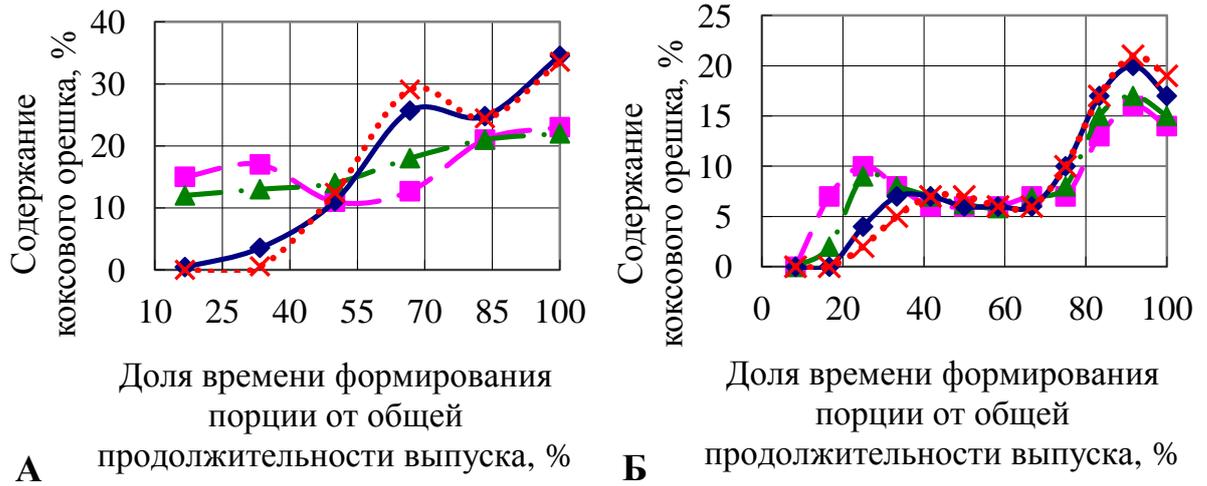


Рисунок 2.24 – Содержание коксового орешка от его расхода по мере истечения в составе железорудных материалов из шихтового бункера БЗУ при размещении его над шихтовыми материалами ( -x- ), в слое железорудного сырья, сформированного из слоев в количестве соответственно 25 и 75% (-■-), 50 и 50% (-▲-), 75 и 25% (-◆-) от массы железорудных материалов, расположенных в бункере БЗУ соответственно под и над орешком: А – загрузка в бункер БЗУ одного скипа; Б – загрузка в бункер двух скипов

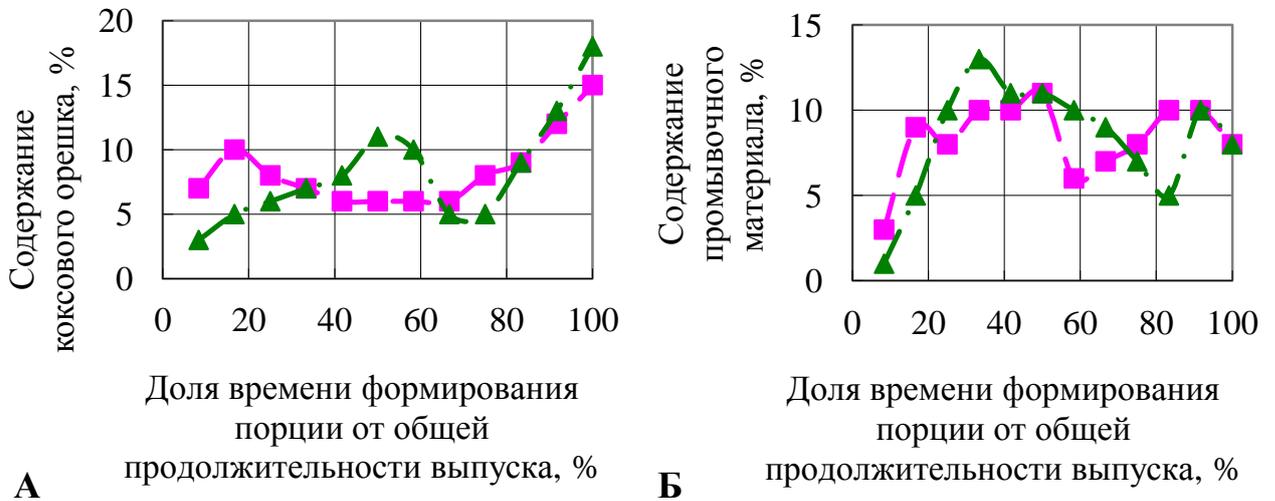


Рисунок 2.25 – Содержание добавочных материалов от их расхода по мере истечения в составе железорудного сырья из шихтового бункера БЗУ при двухскиповом заполнении бункера с дублированием очередности загрузки материалов во втором скипе первому и размещении добавок в каждом из скипов в среднем слое железорудного сырья (-■-) и внизу скипа (-▲-)

Согласно рисунку 2.24 при расположении коксового орешка в слое железорудного сырья и над ним минимальное его содержание наблюдали в начале выпуска, а максимальное в конце. Такой характер распределения коксового орешка свидетельствует о том, что более тяжелые компоненты шихты, такие как промывочный материал, агломерат и окатыши вытесняли орешек в зоне эллипсоида разрыхления, тем самым обеспечивая максимальное его количество в конце выпуска.

Такой характер выпуска материалов из бункера обеспечивал максимальное перемешивание добавочных материалов с железорудным сырьем при следующей последовательности формирования порций в бункере БЗУ: вниз бункера железорудное сырье 40-50% от его расхода, после чего добавочные материалы, следом оставшаяся часть железосодержащей шихты. Удаление или приближение добавочных материалов от выпускного отверстия ухудшало величину показателя их равномерности по ходу выпуска согласно таблице 2.13 [449]. При этом для обеспечения равномерного распределения добавочных материалов по окружности целесообразно загружать железорудное сырье следующим образом: при односкиповой загрузке – в нижнюю часть бункера под коксовым орешком располагать 50 % железорудных материалов от общей их массы и 50 % над ним, а при двухскиповой загрузке в нижнюю часть бункера под коксовым орешком размещают 40 % железорудных материалов от общей их массы и 60 % – над ним [450].

При совместном использовании коксового орешка и марганцевой руды для повышения равномерности распределения марганцевой руды по окружности колошника и улучшения смешивания ее с коксовым орешком в процессе совместного выпуска их в составе шихты из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи загрузку марганцевой руды в бункер БЗУ необходимо осуществлять после загрузки коксового орешка.

Для поступления коксового орешка в зону рудного гребня целесообразно загружать его в бункер БЗУ с железорудными материалами с последующим

открытием шихтового затвора для выгрузки шихты на станции углового положения лотка № 9-7 или 8-6 при вращении лотка по окружности с одновременным изменением его углового положения в направлении от периферии к центру печи.

### **2.3 Выявление источников неравномерного распределения железорудных материалов, загружаемых в доменную печь**

Результаты распределения агломерата и окатышей по порциям и крупности в процессе выпуска их из бункера бесконусного загрузочного устройства лоткового типа в колошниковое пространство печи в опыте 1 по таблице 2.1 приведено в таблицах 2.14-2.18 и на рисунках 2.26 и 2.27 [451].

Таблица 2.14 – Результаты распределения условных единиц массы агломерата по порциям и фракциям в опыте № 1

Уровни факторов	1	2	3	4	5	Сумма строк
>25, мм	984	1382	1077	1295	1236	5973
17,5 – 25, мм	2654	4686	3542	3740	3501	18122
15 – 17,5, мм	1616	2796	2550	2659	2567	12189
12 – 15, мм	2381	3350	5226	5553	3756	20266
10 – 12, мм	1093	5427	3018	3363	2937	15837
8 – 10, мм	829	2947	3628	3214	3569	14186
5 – 8, мм	271	754	542	1090	1113	3770
3 – 5, мм	39	97	100	141	123	498
1 – 3, мм	18	45	45	56	129	293
Сумма столбцов	9884	21483	19728	21109	18929	91134

Из анализа таблиц 2.14 и 2.15 видно, что агломерат и окатыши по крупности и порциям распределяются неравномерно. Масса агломерата в порциях № 1 и 4 различается более чем в 2 раза. Превышение массы окатышей в порции № 1 по сравнению с суммарной массой порций № 2-5 составляет более чем в 5 раз. Дисперсионные отношения Фишера на уровне значимости

$p \leq 0,05$  и (таблицы 2.16 и 2.17) свидетельствуют о существенном влиянии входных переменных, характеризующих распределение материала по номеру порции  $Q$  и крупности  $M$ , включая их взаимодействие  $QM$ .

Таблица 2.15 – Результаты распределения условных единиц массы окатышей по порциям и фракциям в опыте № 1

Уровни факторов	1	2	3	4	5	Сумма строк
>25, мм	28	0	0	0	0	28
17,5 – 25, мм	565	24	32	0	0	621
15 – 17,5, мм	1079	19	125	85	214	1522
12 – 15, мм	8017	107	50	28	248	8451
10 – 12, мм	803	339	0	36	316	1493
8 – 10, мм	3	0	0	0	0	3
5 – 8, мм	0	0	0	0	0	0
3 – 5, мм	0	0	0	0	0	0
1 – 3, мм	0	0	0	0	0	0
Сумма столбцов	10495	489	207	149	778	12118

Таблица 2.16 – Результаты дисперсионного анализа распределения агломерата по порциям и крупности в опыте №1

Источник рассеивания	$SS$	$F$	$p$	$\eta^2$	Общая $SS$	Общая дисперсия	Ошибка эксперимента
$Q$	468	16,3	0,00	0,09	5164	58	2,679
$M$	3983	69,5	0,00	0,77			
$QM$	390	1,7	0,05	0,08			
Ошибка	323	-	-	0,06			

Таблица 2.17 – Результаты дисперсионного анализа распределения окатышей по порциям и крупности в опыте №1

Источник рассеивания	$SS$	$F$	$p$	$\eta^2$	Общая $SS$	Общая дисперсия	Ошибка эксперимента
$Q$	468	225,7	0,00	0,13	3454	39	1,155
$M$	649	156,6	0,00	0,19			
$QM$	2276	139,4	0,00	0,66			
Ошибка	60	-	-	0,02			

Общие результаты дисперсионного анализа для всего комплекса исследований сведены в таблицу 2.18. Наиболее существенное влияние на неравномерность распределения компонентов шихты оказывает крупность материала (признак  $M$ ). Для агломерата и окатышей средняя доля для признака  $M$  составляет соответственно 0,71 и 0,61.

Варьирование долей массы материала признака  $Q$  в опытах 1-9 для агломерата и окатышей находилась в диапазонах от 0,01 до 0,27 и от 0,02 до 0,15 соответственно. Распределение материалов по порциям зависело от содержания окатышей в железорудной части шихты и последовательности их загрузки в бункер БЗУ. Наиболее высокую долю переменной  $Q$  как источника рассеивания вызывала повышенная доля окатышей (опыты № 7-9) и расположение их в нижней части бункера БЗУ (опыты № 1, 4, 7). В условиях совместного их действия величина доли переменной  $Q$  для агломерата была максимальна и составляла 0,27.

Таблица 2.18 – Оценка долей источников рассеивания для результатов эксперимента

Номер опыта	Доли источников рассеивания по признакам относительно общей $SS$ , принятой за 1									
	для признаков агломерата					для признаков окатышей				
	$SS$	$Q$	$M$	$QM$	$Er$	$SS$	$Q$	$M$	$QM$	$Er$
1	5164	0,09	0,77	0,08	0,06	3454	0,13	0,19	0,66	0,02
2	4597	0,00	0,87	0,06	0,07	487	0,04	0,79	0,13	0,04
3	4401	0,01	0,90	0,03	0,06	572	0,08	0,57	0,27	0,08
4	5081	0,25	0,52	0,18	0,05	8569	0,15	0,38	0,45	0,02
5	3376	0,02	0,86	0,06	0,06	4115	0,02	0,69	0,22	0,07
6	3284	0,08	0,83	0,07	0,02	5005	0,05	0,74	0,19	0,02
7	3282	0,27	0,45	0,19	0,09	12750	0,07	0,61	0,30	0,02
8	2303	0,13	0,62	0,11	0,14	10229	0,03	0,79	0,16	0,02
9	3062	0,20	0,59	0,15	0,06	11652	0,05	0,74	0,18	0,03
Среднее	3839	0,12	0,71	0,10	0,07	6315	0,07	0,61	0,28	0,04

Для окатышей весомое значение имело взаимодействие признаков  $Q$  и  $M$  со средней долей влияния 0,29. Максимальные доли влияния взаимодействий,

равные 0,66; 0,45 и 0,30, наблюдали для условий размещения окатышей в нижней части бункера БЗУ соответственно с их содержанием от железорудной части шихты 10, 30 и 50 %.

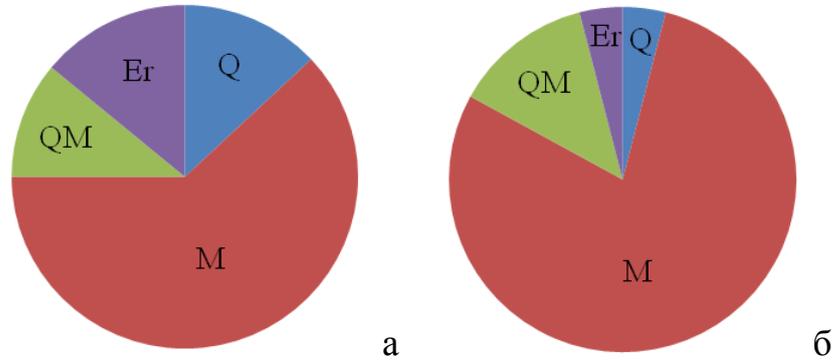


Рисунок 2.26 – Минимальные величины  $SS_y$  и их разложения на объясняющие компоненты для агломерата (а), ( $SS_{y(\min)}=2303$ ) и окатышей (б), ( $SS_{y(\min)}=487$ )

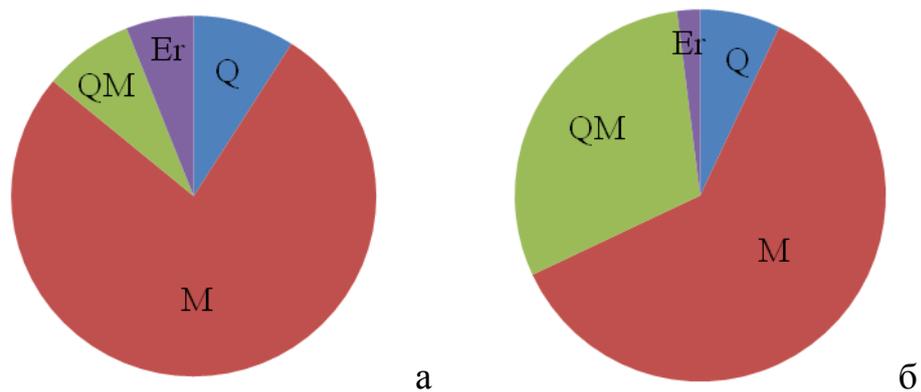


Рисунок 2.27 – Максимальные величины  $SS_y$  и их разложения на объясняющие компоненты для агломерата (а), ( $SS_{y(\max)}=5164$ ) и окатышей (б), ( $SS_{y(\max)}=12750$ )

Таким образом, методом дисперсионного анализа были выявлены источники возмущений, объясняющих общую дисперсию наблюдаемой неравномерности при разных режимах загрузки железорудных материалов (агломерата и окатышей) в колошниковое пространство доменной печи. При этом доля ошибки воспроизводимости эксперимента в общей дисперсии результативного признака колебалась в диапазоне от 2 до 14% в опытах с агломератом и от 2 до 8% в опытах с окатышами. Минимальная и максимальная

неравномерности, определяемые на основе  $SS_y$  разложения на объясняющие компоненты, представлены на рисунках 2.26 и 2.27 соответственно [452].

## **2.4 Каноническая связь параметров загрузки и показателя равномерности поступления шихты на колошник доменной печи**

Метод множественной регрессии позволил описать воздействие только некоторых входных переменных на отдельно исследуемые отклики. Однако интерес представляет совокупный показатель равномерности поступления шихтовых материалов из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи, зависящий от воздействия всей совокупности факториальных признаков. В связи с этим оценили каноническую связь между блоками входных и выходных переменных, представленных в таблице 2.7.

Максимальная каноническая корреляция  $\rho$  между блоками М и К для первой пары переменных (корень 1) составила 0,9173 (таблица 2.19, рисунок 2.28), что подтверждает наличие сильной зависимости между параметрами загрузки компонентов шихты и равномерностью их поступления из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи. Статистическая значимость для корней 1-3 подтверждается величиной  $\chi_i^2$  – критерием (см. таблицу 2.19) на уровне значимости  $\alpha < 0,01$ :  $\chi_1^2(20) = 224,797 > \chi_{\text{табл}}^2(20) = 45,31$ ,

$$\chi_2^2(12) = 60,878 > \chi_{\text{табл}}^2(12) = 32,91,$$

$$\chi_3^2(12) = 28,789 > \chi_{\text{табл}}^2(6) = 22,46.$$

Величина  $\chi_4^2$  не удовлетворяет требованиям  $\chi_i^2 > \chi_\alpha^2$ .

При этом зависимость между блоками М и К для корней 2 и 3 можно назвать умеренной, поскольку коэффициент корреляции не превышает 0,6 для обоих решений.

В таблицах 2.20 и 2.29 для всех корней (собственных чисел) представлены соответствующие им координаты собственных векторов

(канонические веса) и векторы факторных нагрузок  $W_u$ ,  $W_v$  (факторная структура).

Таблица 2.19 – Оценка статистической значимости определяемых корней  $\lambda^2$  по  $\chi^2$

Номер корня	Коэффициент корреляции $\rho$	Квадрат коэффициента корреляции $\rho^2$	Значение $\chi^2$ – статистики	Число степеней свободы	Уровень значимости $\alpha$	Значение $\Lambda$ -статистики
1	0,92	0,84	224,8	20	0,000	0,08
2	0,55	0,30	60,9	12	0,000	0,504
3	0,51	0,26	28,8	6	0,000	0,724
4	0,14	0,02	1,8	2	0,402	0,980

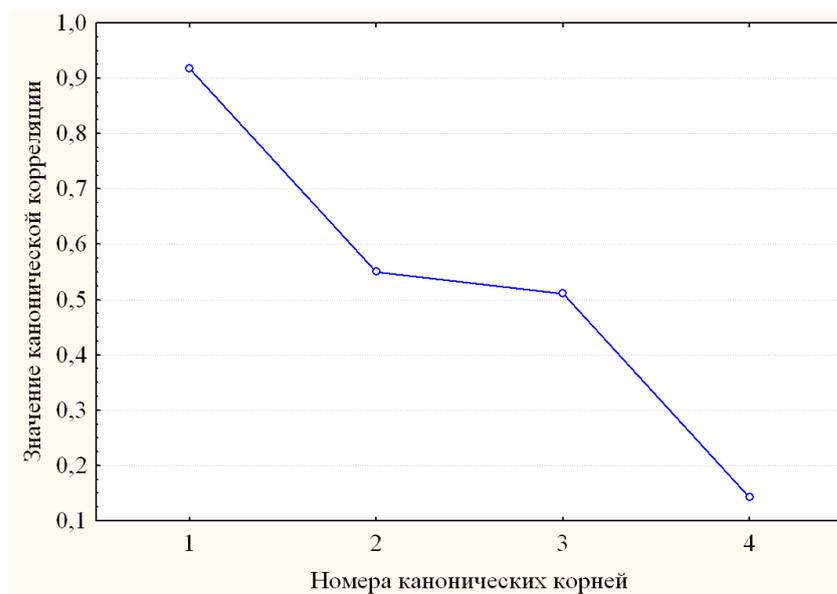


Рисунок 2.28 – Значения канонической корреляции для блоков М и Т

Таблица 2.20 – Канонические веса признаков блоков М и Т, вычисленные для  $i$  – корней

Номер корня	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$
1	0,312	-0,052	0,965	-0,007	-0,025	-0,661	0,610	-0,045	-0,134
2	0,277	0,767	-0,185	0,016	0,332	0,290	0,423	1,059	-0,328
3	0,965	-0,709	-0,149	-0,278	0,048	0,661	0,553	-0,200	-0,483

Таблица 2.21 – Факторная структура для определения корней блоков М и Т

Номер корня	М <sub>1</sub>	М <sub>2</sub>	М <sub>3</sub>	М <sub>4</sub>	М <sub>5</sub>	Т <sub>1</sub>	Т <sub>2</sub>	Т <sub>3</sub>	Т <sub>4</sub>
1	0,276	0,103	0,956	0,194	0,056	-0,783	0,746	-0,134	-0,161
2	0,610	0,891	-0,140	-0,017	0,366	0,181	0,315	0,849	0,258
3	0,679	-0,313	-0,238	-0,309	0,038	0,556	0,433	-0,511	-0,601

Статистические данные, приведенные в таблицах 2.20 и 2.21, идентичны по распределению канонических весов и факторных нагрузок для переменных, имеющих наиболее весомый вклад. Очевидно, максимально возможная корреляция  $\rho = 0,9173$  между двумя многомерными признаками М (параметры загрузки) и К (показатель равномерности) определяется в основном вкладами  $D_{OK}$  (содержание окатышей от расхода железорудной части шихты),  $Ш_{OK}$  – расположение окатышей в бункере БЗУ,  $K_A$  (показатель равномерности поступления агломерата) и  $K_{OK}$  (показатель равномерности поступления окатышей).

График канонической связи переменных  $U(M)$  и  $V(T)$  при  $\rho = 0,9173$  приведен на рисунке 2.29.

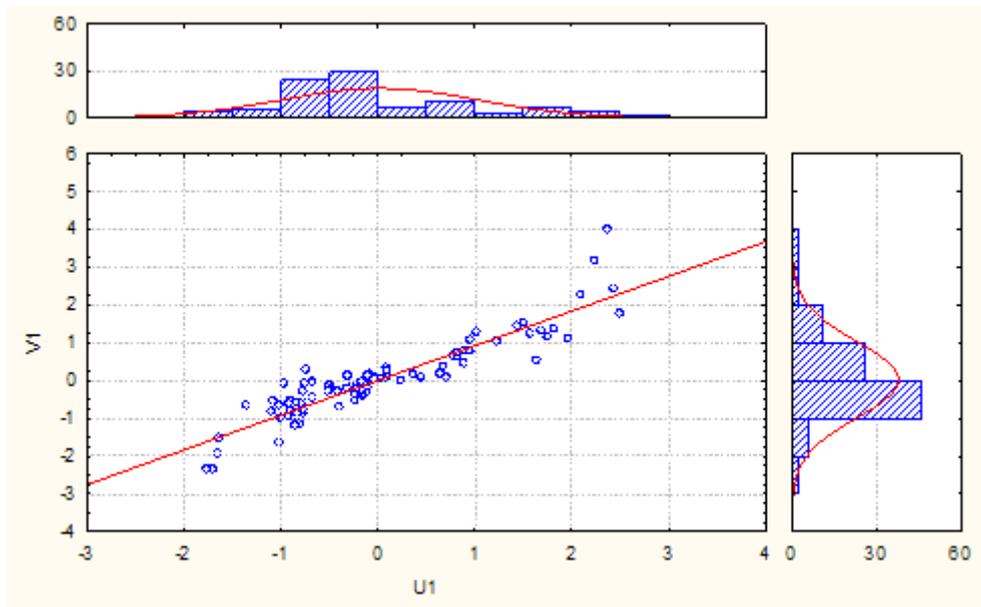


Рисунок 2.29 – Корреляционное поле канонических переменных, совмещенное с гистограммой распределения данных по ним

Из рисунка 2.29 следует, что корреляционное поле канонических переменных  $U_1$  и  $V_1$  «вытянуто» вдоль предполагаемой линии регрессии,  $V(T) = 0,92U(M)$ . Исходя из определения  $\rho = \rho(\alpha^T M, \beta^T T)$  для стандартизованных значений входных  $M_j, j = \overline{1, k}$  и выходных  $T_j, j = \overline{1, q}$  признаков и принимая во внимание ограничение на дисперсию  $\sigma_u^2 = \sigma_v^2 = 1$ , трудно установить, какая часть дисперсии переменной  $U$  объясняется переменной  $V$  и наоборот. Действительно, если с помощью оценки коэффициента регрессии « $b$ » выразить одну величину через другую:  $V = b \cdot U$ , где  $b = \rho \frac{\sigma_v}{\sigma_u}$ , то очевидно, что нельзя установить долю дисперсии, объясняемую значением  $\rho^2$ , для каждой в отдельности канонической переменной в силу равенства их дисперсий. Значение  $\rho^2$  есть доля дисперсии, общей для взвешенных сумм по обоим блокам данных  $M$  и  $K$ . В связи с этим долю объясняемой дисперсии для канонических переменных в отдельности  $U$  и  $V$  определили косвенно с помощью коэффициентов факторной структуры  $\omega_{ij}$  (факторных нагрузок). Возведенная в квадрат факторная нагрузка  $\omega_{ij}^2$  есть доля дисперсии, объясняемая каждой переменной в канонической переменной соответствующего множества. Следовательно, для каждого корня  $\lambda_i^2$  определили среднее значение этих долей  $\overline{\sigma_i^2}$  по каждой канонической переменной  $U_i$  и  $V_i$ :  $\overline{\sigma_i^2(U_i)} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \omega_{ij}^2$  и  $\overline{\sigma_i^2(V_i)} = \frac{1}{q} \sum_{j=1}^q \omega_{ij}^2$ , где  $k, q$  – число переменных в соответствующих блоках  $M$  и  $K$ ;  $\omega_{ij}^2$  – определяемые для каждого корня нагрузочные коэффициенты  $i$ -фактора ( $i = \overline{1, c}, c \leq q$ ) на  $j$  признак в соответствующей группе признаков  $M$  или  $K$ .

После умножения значения  $\rho_i^2 = \lambda_i^2$  на соответствующие доли извлеченной дисперсии отдельно по каждой группе переменных  $M$  и  $K$

получили так называемую меру «избыточности» одного блока данных по отношению к другому:

$$\text{Re dand}(\alpha_i^T M) = \overline{\sigma^2(U^i)} \cdot \lambda_i^2, \text{Re dand}(\beta_i^T T) = \overline{\sigma^2(V^i)} \cdot \lambda_i^2.$$

Результаты показывают, что блок К имеет преимущества по суммарной величине извлеченной дисперсии и суммарной мерой избыточности по сравнению с блоком данных М, что выражается в процентном соотношении соответственно 100:81,5 и 40,2:29,6. Причиной может являться наличие межгрупповых вариаций измерений признаков блока М.

## Выводы по главе 2

1. Для построения интерактивной системы физическим и математическим моделированием установлены закономерности поступления компонентов шихты из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи для различных условий загрузки, позволяющие рационально распределять материалы по радиусу колошника и равномерно по окружности печи. Разработаны математические зависимости очередности и равномерности поступления из шихтового бункера железорудных материалов (агломерат, окатыши) и добавочных материалов (коксовый орешек или коксовая фракция, компонент для формирования защитного гарнисажа, промывочный материал) по видам и крупности для различных условий загрузки с целью учёта их при назначении матрицы загрузки.

2. Загрузка сырья в бункер БЗУ объемом один скип в составе 30% окатышей и 70% агломерата, с расположением окатышей в нижней части бункера, после чего агломерат, при моделировании обеспечивало отношение количеств окатышей к количеству всего железорудного сырья в трехкольцевых зонах колошника в направлении движения лотка, соответственно 0,71; 0,15 и 0,04. Движение лотка от периферии к центру при загрузке позволяет формировать пристеночную зону печи в среднем из смеси, включающей 29% агломерата и 71% окатышей. В некоторых локальных зонах доля окатышей превышает 90-95%.

3. Отдаление окатышей от выпускного отверстия путем размещения их в бункере БЗУ над агломератом изменяет очередность поступления материалов в колошниковое пространство печи. Выпуск компонентов шихты в колошниковое пространство печи с трех станций углового положения лотка при расположении окатышей в бункере БЗУ над агломератом обеспечивает максимальное их поступление со второй станции углового положения лотка в середине выпуска. При содержании окатышей 30% отношение их массы к железорудному сырью в трех кольцевых зонах колошника составляет 0,16; 0,43; 0,32.

4. При работе доменной печи с повышенной долей окатышей, превышающей 40-45%, для сохранения целостности футеровки шахты, распара и заплечиков целесообразно использовать двухскиповую систему набора железорудной части шихты в бункер БЗУ, загружая окатыши в бункер последним после агломерата. В лабораторных экспериментах размещение окатышей в количестве 45% от железорудной части шихты над агломератом дало на выходе из бункера первые две порции, состоящие полностью из агломерата (без окатышей).

5. При работе доменной печи с настылью целесообразно загружать окатыши в нижнюю часть бункера БЗУ. Такой режим обеспечивает поступление их в пристеночную зону колошника, что при эксплуатации печи позволяет ликвидировать настыль воздействием на неё окатышами. В лабораторных экспериментах при доле окатышей 50% от расхода железорудной части шихты размещением их в нижней части бункера БЗУ и направлением движения лотка от периферии к центру получили в периферийной зоне колошника слой, состоящий из 82 % окатышей и 18% агломерата.

6. Расположение титаномагнетитовой руды в нижней части бункера БЗУ в условиях как односкипового, так и двухскипового набора материалов в бункер БЗУ обеспечивало максимальное ее содержание в начале выпуска. Движение лотка при этом от периферии к центру позволило размещать руду в пристеночной зоне печи. Такой режим целесообразен для формирования защитного гарнисажа.

7. В условиях выгрузки шихты с трех станций углового положения лотка, соответствующих зоне рудного гребня, коксовый орешек целесообразно загружать в слой железорудного сырья между порциями в количестве 50 и 50, от массы железорудных материалов, расположенных в бункере БЗУ соответственно под и над орешком. Такая загрузка обеспечивает равномерное распределение кокса мелких фракций по окружности зоны рудного гребня. Расходование его на проведение процессов восстановления сокращает потребность в крупном коксе и исключает поступление мелочи в горн.

8. В условиях начала выгрузки шихты на периферию или в промежуточную зону между периферией и рудным гребнем целесообразно загружать коксовый орешек в бункер БЗУ последним. Это отодвигает кокс мелких классов от периферии.

9. Устанавливать порядок загрузки промывочных материалов – марганцевой или железной руды – необходимо из расчета максимального их поступления в колошниковое пространство печи по истечении 30-50% времени после открытия шихтового затвора. Нижняя граница относится к размещению промывочных материалов в нижней половине слоя, верхняя к расположению их в верхней половине.

10. Разработаны новые режимы загрузки железорудных материалов, позволяющие повышать равномерность их окружного распределения. Наиболее высокую величину показателя равномерности поступления железорудных материалов по массе обеспечивала следующая последовательность загрузки компонентов шихты в бункер БЗУ: на дно шихтового бункера 25 % агломерата, затем окатышей с добавочными материалами, далее загрузка оставшегося 75 % агломерата. При содержании окатышей 30-38% от расхода ЖРС величина показателя равномерности распределения превышала 0,75.

11. Дисперсионным анализом выявили источники неравномерного распределения железорудной шихты, загружаемой в доменную печь. Наиболее существенное действие оказывает крупность материалов. Средние доли влияния для агломерата и окатышей составляли соответственно 0,71 и 0,62.

Остальное приходилось на распределение массы по порциям и эффект взаимодействия двух переменных. Выявили максимальную каноническую взаимосвязь факториальных и результативных признаков с коэффициентом корреляции  $\rho$ , равным 0,92.

12. Выявлено распределение мелочи агломерата, соотношения эквивалентной по поверхности и средневзвешенной крупности его по ходу выпуска из бункера БЗУ. Установлено, что использование агломерата с содержанием фракции (-5) мм более 10% приводит к скоплению мелочи в зонах, соответствующих тем станциям лотка, где завершается выпуск. В условиях движения лотка от периферии к центру таковыми зонами могут быть рудный гребень и промежуточная часть между рудным гребнем и осевой зоной.

13. Разработаны новые режимы загрузки железорудных материалов, позволяющих обеспечивать повышенную равномерность окружного распределения по крупности. Для обеспечения равномерного распределения железорудного сырья по крупности в процессе выпуска его из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи с целью достижения рационального распределения газового потока через слой шихты по окружности целесообразно материал с более высокой эквивалентной по поверхности крупностью располагать в слое материала с меньшей крупностью. Наиболее высокую равномерность поступления компонентов шихты по крупности из бункера БЗУ обеспечивает загрузка окатышей в середину слоя агломерата. При доле окатышей 38% от расхода железорудной части шихты величина показателя равномерности составила 0,90.

14. Созданы программы для ЭВМ: «Определение коэффициента однородности по видам и крупности компонентов шихты, поступающих из бункера БЗУ в колошниковое пространство доменной печи», «Определение рационального режима загрузки шихтовых материалов в колошниковое пространство доменной печи, оснащенной БЗУ лоткового типа», «Определение рационального режима загрузки коксового орешка в колошниковое пространство доменной печи, оснащенной БЗУ лоткового типа», «Расчет

коэффициента равномерности поступления агломерата и окатышей из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи при различных условиях загрузки», «Выявление рационального режима набора агломерата и окатышей в бункер БЗУ лоткового типа, обеспечивающего однородное по крупности поступление их в колошниковое пространство доменной печи», имеющие государственную регистрацию. Программы позволяют выявлять рациональные режимы загрузки для различных шихтовых условий, определяют коэффициент равномерности поступления железорудных и добавочных материалов из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи.

### Глава 3 ОЦЕНКА НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ГАЗОВ ПО ОКРУЖНОСТИ ПЕЧИ И ПУТИ ПОНИЖЕНИЯ ЕЕ ВЕЛИЧИНЫ

#### 3.1 Разработка методики определения коэффициента неравномерности распределения материалов и газов по окружности печи

Разработали и предложили методику определения коэффициента, отражающего соответствие технологическому регламенту распределения шихтовых материалов и газов по окружности печей.

Для оценки неравномерности распределения шихтовых материалов на колошнике доменной печи через изменение температур периферийных газов по окружности в  $i$ -точках,  $i = \overline{1, N}$  можно применить коэффициент вариации, представляющий отношение эмпирического стандарта  $S$  к среднему результату  $\bar{x}$  измеряемой величины  $X$ . Коэффициент вариации  $V = S / \bar{x}$  зависит от величины  $S^2$ , которая имеет несимметричную доверительную оценку:

$$P \left\{ \frac{K \cdot S^2}{\chi_k^2(\alpha/2)} < \sigma^2 < \frac{K \cdot S^2}{\chi_k^2(1-\alpha/2)} \right\} = 1 - \alpha, \quad (3.1)$$

где  $\alpha$  – уровень значимости;

$\chi_k^2$  – статистика Пирсона для  $k=N-1$  степеней свободы [453, 454].

Применительно к оценке неравномерности окружного распределения материалов в доменной печи, при измерении температуры газа на периферии в верхней части доменной печи будем использовать следующие обозначения:

$n_i$  – замеряемая температура газа в  $i$ -й точке, где  $i = \overline{1, N}$ , где  $N$  – число точек замера температуры;

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i = \frac{n}{N} = \bar{n} \text{ – среднее (ожидаемое) значение температуры;}$$

$$\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(n_i - \frac{n}{N}\right)^2 = \hat{\sigma}^2 = S^2 \text{ – оценка дисперсии.}$$

При этом значения случайной величины  $S^2$  подчинены распределению

$$\chi_{(k)}^2 = \frac{k \cdot S^2}{\sigma^2}, \text{ где } \frac{k}{\sigma^2} = \text{const} \text{ и ожидаемое среднее } \bar{n} \text{ в решаемой задаче}$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i = \bar{n} = \text{const} \text{ для всех } i\text{-х групп, } i = \overline{1, N}. \text{ Тогда коэффициент вариации}$$

$$V = S / \bar{n} = \frac{N}{n\sqrt{(N-1)}} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(n_i - \frac{n}{N}\right)^2}. \quad (3.2)$$

При этих же определяемых характеристиках для  $X^2$ - статистики в условиях равномерного распределения получаем

$$X^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(n_i - \bar{n})^2}{\bar{n}} = \sum_{i=1}^N \frac{(n_i - n/N)^2}{n/N} = \frac{N}{n} \sum_{i=1}^N \left(n_i - \frac{n}{N}\right)^2. \quad (3.3)$$

Откуда очевидна связь

$$V^2 = \frac{N^2}{n^2(N-1)} \sum_{i=1}^N \left(n_i - \frac{n}{N}\right)^2 = \frac{N}{n(N-1)} X^2, \text{ или } X^2 = \frac{n(N-1)}{N} V^2, \quad (3.4)$$

где  $n = \sum_{i=1}^N n_i$ ,  $n_i$  – значение измеряемой величины в  $i$ -точке, отождествляемое с частотой в  $i$ -группе формулы для  $X^2$  статистики, предложенной также К. Пирсоном в 1904 году для проверки  $H_0$ -гипотезы соответствия эмпирического и теоретического распределений на основе  $\chi_k^2$ -статистики с  $k$  степенями свободы [429, 455].

Таким образом, коэффициент вариации  $V$ , применяемый для оценки неравномерности распределения материала в  $i$ -группах относительно постоянной (равномерной) величины  $\bar{n}$  предполагает, что случайная величина  $V^2$  имеет  $\chi_k^2$  распределение с  $k=N-1$  степенями свободы.

В данном исследовании мы не ставим задачу принять или отвергнуть нулевую гипотезу на заданном уровне значимости. В нашем случае нулевую гипотезу следует рассматривать не как утверждение об отсутствии эффекта для ее отклонения, а насколько велик эффект отклонения от тривиального случая. Следовательно, мы ставим задачу неоднократного определения вероятности эффекта при изменении условий эксперимента, порождающего данный эффект.

Для получаемого значения величины  $\chi_k^2$ , используя закон ее распределения, находим уровень вероятности или коэффициент окружной неравномерности распределения физических величин, употребляемых материалов и газов  $p = p(\chi^2)$ ,  $p \in (0;1)$  [429].

Таким образом, для разных режимов загрузки шихты в колошниковое пространство мы получаем меру неравномерности распределения материалов и газов, а также температуры по окружности печи. При этом уместно заметить следующее.

Для проверки  $H_0$ -гипотезы, согласно которой случайный вектор частот  $(n_1, n_2, \dots, n_N)$  характеризуется вектором положительных вероятностей, причем  $p_1 + p_2 + \dots + p_N = 1$ , статистика  $X^2$  основана на формуле

$$X^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N \frac{n_i^2}{p_i} - n, \quad (3.5)$$

где  $n = n_1 + n_2 + \dots + n_N$ ,  $n_i \geq 5$ ,  $i = \overline{1, N}$ .

При  $n \rightarrow \infty$  и выполнении  $H_0$ -гипотезы  $X^2 \rightarrow \chi_k^2$  с  $k = N - 1$  степенями свободы. Для заданного уровня значимости  $\alpha$  гипотеза  $H_0$  отвергается при  $X^2 \geq \chi_{N-1}^2(\alpha)$ , где  $\chi_{N-1}^2(\alpha)$  – верхняя  $\alpha$ -квантиль  $\chi_k^2$ -распределения. Вероятность ошибки  $p\{\chi_{N-1}^2 \geq \chi_{N-1}^2(\alpha)\} = \alpha$ .

Статистику  $X^2$  используют также для проверки  $H_0$ -гипотезы о принадлежности функции распределения независимых одинаково распределенных случайных величин  $X_1, X_2, \dots, X_N$  семейству непрерывных

функций  $F(x, \theta)$ ,  $x \in R^1$ , зависящих от неизвестного параметра  $\theta$  [456]. Тогда разбивая действительную прямую точками  $x_0 < x_1 < \dots < x_N$  (для общего случая  $x_0 = -\infty$ ,  $x_N = +\infty$ ) на  $N$ ,  $N > m$  интервалов  $(x_0, x_1)$ , ...,  $(x_{N-1}, x_N)$  таких, что для определенного параметра  $\theta$   $p_i(\theta) = P\{x_i \in (x_{i-1}, x_i)\} > 0$ ,  $i = \overline{1, N}$ ,  $p_1(\theta) + p_2(\theta) + \dots + p_N(\theta) = 1$  образуют по аналогии с вектором частот  $(n_1, \dots, n_N)$  группировку (в тех же обозначениях) значений случайной величины. Тогда  $X^2(\theta) = \sum_{i=1}^N \frac{(n_i - np_i(\theta))^2}{np_i(\theta)}$  – случайная величина, зависящая от неизвестного параметра  $\theta$ , вычисленная по методу минимума  $X^2(\theta)$ , то есть  $X^2(\tilde{\theta}) = \min X^2(\theta)$  [455, 456], при этом нужно следить, чтобы значения  $n_i \geq 5$ .

Применение  $X^2$ -статистики для проверки  $H_0$ -гипотезы при измерении физических величин затруднительно [455] из-за определения подходящего (преобразующего) параметра  $\theta$ , способствующего при выполнении  $H_0$ -гипотезы условия, что  $X^2(\theta) = \chi_k^2$ . В этом случае нужно принимать во внимание поведение квантилей распределения  $\chi_{k,p}^2$ , вероятности которых обычно табулированы [429]:

$$p = \frac{1}{2^{k/2} \Gamma(k/2)} \int_0^{\chi_{k,p}^2} x^{(k-2)/2} e^{-x/2} dx, \quad (3.6)$$

где значение  $\chi_{k,p}^2$  представляет собой сумму квадратов  $k$  независимых значений нормальной величины (нормализованной) со средним 0 и дисперсией 1.

Очевидно, что использование  $\chi_k^2$ -статистики при  $k=N-1$  для вычисления  $p = P(\chi_k^2)$  в условиях формирования  $X^2$ -статистики на основе измерений  $n_i$ ,  $i = \overline{1, N}$  исследуемой физической величины необходимо согласование поведения обеих статистик. Для решаемой нами задачи в условиях принятия  $H_0$ -гипотезы о равномерном распределении (при допустимых отклонениях от среднего значения измеряемых результатов  $n_i$  в  $i$ -точках) сложной

корректировки  $X^2$ -статистики не потребуется. В нашем случае корректировка легко выполняется с помощью подходящего коэффициента (квантильного множителя  $q$ ), определяемого из условия  $q \cdot X_{\max}^2 \approx \chi_k^2(\alpha)$ , где  $\chi_k^2(\alpha)$  – верхняя  $\alpha$ -квантиль.  $X_{\max}^2 \in \{X_{(j)}^2\}$ ,  $j = \overline{1, M}$ ,  $M$  – число экспериментов, завершаемых вычислением  $X_{(j)}^2$ -статистики. При этом в корректируемой статистике  $X_{\text{Кор}}^2 = q \cdot X^2$  должно быть выполнено условие Пирсона,  $n_i \geq 5 \quad \forall i = \overline{1, N}$ .

Таким образом, разработана и предложена методика определения относительной неравномерности распределения материалов и газов по окружности печи на основе  $X^2$ -статистики, используя квантили  $\chi_k^2$ -статистики для вычисления  $p = p(\chi_k^2)$ . Установлено, что для использования  $X^2$ -статистики измерений температуры газа по окружности печи необходимо корректировать, минимизируя значения  $X^2$  до верхней  $\alpha$ -квантили  $\chi_k^2(\alpha)$  на заданном уровне значимости  $\alpha = 1 - p$  при  $k=N-1$  степенях свободы [457].

### 3.2 Выявление рациональных режимов загрузки компонентов шихты

Предложенный метод определения неравномерности распределения материалов по окружности колошника опробовали на доменных печах ПАО «ММК» объемом 1370 и 2014 м<sup>3</sup> для исследуемых режимов загрузки [457]. На доменных печах № 2, 4, 6, 9 восьмью парными периодами оценили коэффициент неравномерности распределения материалов и газов по окружности печи  $p$  и технико-экономические показатели ее работы при изменении режима загрузки добавочных материалов в скип «наверх» на режим загрузки «на дно». Согласно физическому моделированию (см. главу 2) смена режима предполагает повышение показателя равномерности поступления компонентов шихты из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи с 0,30 до 0,62 (таблица 3.1). На доменных печах № 4, 6 и 9 шестью парными

периодами исследовали влияние изменения показателя равномерности поступления железорудных материалов из бункера БЗУ на лоток с 0,70 до 0,33 путем смены режима загрузки с «вперемешку» на «добавки наверх скипа». На доменных печах № 4 и 6 исследовали действие разработанных режимов загрузки железорудных материалов в бункер БЗУ на коэффициент неравномерности распределения материалов и газов по окружности печи и сравнили результаты с существующими – режимы загрузки добавки «на дно», «наверх» и «вперемешку». Модернизированные режимы отличались загрузкой окатышей в середину слоя агломерата, между порциями, сформированными из него, в количестве 17 и 83% от массы агломерата, 25 и 75; 50 и 50; 75 и 25, расположенными в бункере БЗУ соответственно под и над окатышами. Средняя величина показателя равномерности поступления шихтовых материалов из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи в условиях загрузки добавочных материалов, в том числе окатышей в смесь агломерата в различных вариантах согласно физическому моделированию составляет 0,71. Доля окатышей для разных печей находилась в интервале 30-37% от железорудной части шихты при незначительном разбеге ее величины в парных периодах, длительность которых составляла 7-9 суток.

Таблица 3.1 – Показатель равномерности поступления железорудных материалов по ходу выпуска из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи при различных режимах загрузки по результатам физического моделирования (см. главу 2)

Режим загрузки окатышей и добавочных материалов в бункере БЗУ	Показатель равномерности $K_{ЖРС}$
На дно	0,30
Наверх	0,62
Вперемешку	0,70
В слой агломерата между порциями, сформированными из него, в количестве 25 и 75; 17 и 83; 50 и 50; 75 и 25	0,71

Коэффициент окружной неравномерности  $p$ , предполагалось определить по значениям измеряемых температур периферийного газа под газоотводами  $T_i, ^\circ\text{C}$ . Поскольку при нормальной работе печи температура периферийных газов под газоотводами в натуральных величинах колеблется в интервале от 80 до 200  $^\circ\text{C}$  относительно среднего значения, то эти изменения, не являясь аналогом частот  $n_i$ ,  $i = \overline{1, N}$ , быстро приводили  $\chi_k^2$ -статистику к верхней  $\alpha$ -квантили  $\chi_k^2(\alpha)$  для всякого приемлемого  $\alpha = 1 - p$ . Следовательно, необходимо было преобразование получаемых измерений температуры так, чтобы приведенная температура, формирующая  $X^2$ -статистику, отражала поведение квантилей  $\chi_{k,p}^2 < \chi_k^2(\alpha)$  распределения Пирсона для  $k=N-1$  в условиях выполнения  $H_0$ -гипотезы.

В связи с этим, первоначально проанализировав работу пяти доменных печей (№ 2, 4, 6, 9, 10), оснащенных бесконусным компактным загрузочным устройством лоткового типа, за период 1 год для различных условий плавки, выявили подходящий коэффициент, равный  $1/5=q$ , позволяющий преобразовать натуральное значение температуры  $T_i, ^\circ\text{C}$ , к аналогичной частоте, а именно  $n_i = T_i / 5$ . Преобразованные величины для некоторых смежных периодов на доменных печах объемом 2014 и 1370  $\text{м}^3$  приведены в таблице 3.2. Такое преобразование дало возможность получить адекватную сходимость по вероятности  $p(X_{\text{кор}}^2) \rightarrow p(\chi_k^2)$  с учетом используемых степеней свободы  $k=N-1$  (проверено для  $4 \leq N \leq 8$ ). Заметим, что при корректировке значений  $i$ -измерений в нашем случае величина  $X^2$  также корректируется автоматически, что удобно для расчета числовых характеристик. Сравнивая результаты столбцов  $V$  и  $p$  (таблица 3.3) следует заметить, что оценки неравномерности распределения для столбцов  $p$  более различимы, чем в столбцах  $V$  [457].

В среднем величины коэффициентов неравномерности распределения материалов и газов для различных режимов загрузки в исследуемых 19 парных периодов на доменных печах № 2, 4, 6 и 9 ПАО «ММК» приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.2 – Распределение приведенных температур периферийного газа в разных периодах и условиях загрузки доменных печей ПАО «ММК»

Объем ДП, м <sup>3</sup>	Режим загрузки окатышей и добавочных материалов в бункере БЗУ	Приведенные температуры периферийного газа под газоотводами по точкам замера $n_i$							
		1	2	3	4	5	6	7	8
2014	На дно	31,7	33,6	30,7	18,0	25,2	21,2	20,7	21,8
	Наверх	30,1	32,0	30,1	17,3	25,5	21,0	21,0	20,9
1370	Наверх	36,1	39,0	40,1	31,0	-	-	-	-
	В слой агломерата между порциями, сформированными из него, в количестве 50 и 50 %	31,9	36,6	35,7	29,5	-	-	-	-

Таблица 3.3 – Описательная статистика для оценки неравномерности распределения шихтовых материалов и газов по окружности колошника

Объем ДП, м <sup>3</sup>	Режим загрузки окатышей и добавочных материалов в бункере БЗУ	Среднее	Число степеней свободы $k$	Оценка дисперсии	Коэффициент вариации $V$	$X_{кор}^2 = \chi_k^2$ статистика	Вероятность $p_i = p(\chi_k^2)$ (коэффициент окружной неравномерности распределения температур)
2014	На дно	25,4	7	34,6	0,23	10,0	0,81
	Наверх	24,8	7	29,9	0,22	9,1	0,75
1370	Наверх	36,5	3	16,6	0,11	1,36	0,29
	В слой агломерата	33,4	3	11,0	0,10	0,99	0,20

Таблица 3.4 – Коэффициент неравномерности распределения материалов и газов по окружности доменных печей № 2, 4, 6 и 9 ПАО «ММК» и их технико-экономические показатели при различных режимах загрузки

Режим загрузки окатышей и добавочных материалов в бункере БЗУ	$X_{кор}^2 = \chi_k^2$ статистика	$p_t$	Удельная производительность, т/м <sup>3</sup>	Удельный расход кокса, кг/т чугуна
На дно	7,3	0,77	2,62	462,1
Наверх	4,1	0,46	2,65	458,0
Вперемешку	1,8	0,39	2,66	456,7
В слой агломерата между порциями, сформированными из него, в количестве 25 и 75; 17 и 83; 50 и 50; 75 и 25	1,7	0,34	2,67	454,4

Из анализа полученных результатов следует, что смена режима «добавки на дно бункера» на «добавки наверх бункера» сопровождалась более равномерным распределением материалов в колошниковом пространстве печи, на что указывает уменьшение коэффициента неравномерности распределения температур по окружности печи  $p$  от 0,77 до 0,46. Это является результатом более равномерного поступления агломерата и окатышей при выгрузке порции шихты из бункера БЗУ на лоток и подтверждается результатами физического моделирования (см. рисунки 2.14, 2.15). Удельная производительность печи увеличилась в среднем с 2,62 до 2,65 т/м<sup>3</sup> при понижении удельного расхода кокса с 462,1 до 458,0 кг/т чугуна.

Использование режима загрузки «вперемешку» обеспечивало наиболее высокую равномерность распределения материалов и газов по окружности печи из всех используемых в настоящее время в ПАО «ММК» режимов загрузки. Величина коэффициента неравномерности составила 0,39. Работа печи с более равномерным распределением железорудных материалов по окружности печи по сравнению с режимами загрузки «добавки на дно бункера» и «добавки наверх» обеспечивала более высокую производительность при пониженном удельном расходе кокса, равными соответственно 2,66 т/м<sup>3</sup> и 456,7 кг/т чугуна.

Наиболее низкую величину коэффициента неравномерности, равную 0,34, обеспечивало расположение добавочных материалов, в том числе окатышей, в слое агломерата, между порциями в количестве 25 и 75; 17 и 83; 50 и 50; 75 и 25%, расположенными в бункере БЗУ соответственно под и над добавочными материалами совместно с окатышами. Работа печи с разработанными и внедренными режимами загрузки обеспечивала наиболее высокие технико-экономические показатели плавки – производительность печи 2,67 т/м<sup>3</sup>, удельный расход кокса 454,4 кг/т чугуна [457, 458].

### **3.2.1 Взаимосвязь коэффициента неравномерности распределения железорудных материалов и газов по окружности колошника с показателями хода процессов работы печи**

Проведением исследований на доменных печах № 4, 6 и 9 ПАО «ММК» оценили влияние коэффициента неравномерности распределения материалов и газов по окружности, представленного в виде коэффициента окружной неравномерности распределения температур, на показатели их работы, в том числе показатели хода процессов: газодинамический режим, интенсивность по дутью, газу и шихтовым материалам, восстановление железа из оксидов и тепловая работа печи по зонам (таблицы 3.5-3.8).

Таблица 3.5 – Изменение основных технологических показателей работы доменных печей № 4, 6, 9 (% отн.)

Наименование показателей	Изменение режима загрузки добавочных материалов в бункер БЗУ		
	низ→слой	низ→верх	верх→слой
Изменение коэффициента окружной неравномерности распределения температур $p_t$	-55,8	-40,3	-26,1
Изменение удельного расхода кокса (сухого, скипового)	-1,21	-0,72	-0,69
Изменение удельной производительности	2,7	1,9	0,7

Таблица 3.6 – Показатели окружной неравномерности распределения материалов на доменной печи № 4

Наименование показателей	Коэффициент окружной неравномерности распределения температур $p_t$		
	0,51	0,46	0,38
Номер периода	I	II	III
Режим загрузки добавочных материалов в скип	верх	дно	верх
Длительность периода, сут	8	7	7
Показатель равномерности поступления железорудных материалов по ходу их выпуска из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи при физическом моделировании $K_{ЖРС}$ , рассчитанный по формуле (2.2)	0,30	0,62	0,76
Доля агломерата, располагающегося под окатышами в бункере БЗУ, %	0	100	17

В среднем для семи парных смежных периодов работы доменных печей № 4, 6, 9 влияние смены режима загрузки компонентов шихты в колошниковое пространство печи представили в виде изменений показателей работы печей. В первой серии экспериментов на доменных печах № 4 и 6 в базовых периодах окатыши и добавочные материалы размещали в нижней части бункера БЗУ. В опытных периодах обеспечивали их расположение между слоями, сформированными из агломерата в среднем для двух периодов в количестве 20 и 80%, располагающимися соответственно под и над окатышами. Изменение режимов загрузки сопровождалось более равномерным распределением материалов и газов по окружности колошника, на что указывает уменьшение коэффициента окружной неравномерности распределения температур в опытных периодах по сравнению с базовыми на 55,8% (см. таблицу 3.5). Вторую серию

экспериментов проводили на доменных печах № 4, 6, 9. В базовых периодах окатыши и добавочные материалы размещали в нижней части бункера БЗУ. В опытных периодах обеспечивали их расположение над агломератом. Изменение режима загрузки сопровождалось улучшением окружной неравномерности, на что указывает уменьшение коэффициента окружной неравномерности на 40,3%. В третьей серии экспериментов, проведенной на доменных печах № 4 и 6 в базовых периодах окатыши загружали в бункер БЗУ после агломерата. В опытных периодах их размещали между слоями, сформированными из агломерата в среднем для двух периодов в количестве 20 и 80%. В результате уменьшение коэффициента окружной неравномерности составило 26,1%.

Повышение равномерности распределения материалов по окружности печи сопровождалось снижением удельного расхода кокса и повышением производительности печи согласно таблице 3.5.

Подробно рассмотрели работу доменной печи № 4 в трех периодах, длительностью по 7-8 суток. В первом периоде коэффициент окружной неравномерности составил 0,51. Такая величина обеспечивалась работой печи с режимом загрузки «добавки наверх скипа», что согласно физическому моделированию обеспечивало низкую величину показателя равномерности поступления железорудных материалов из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи, равную 0,30 (см. таблицу 3.6).

В периоде II при сохранении доли окатышей, равной 30% от железорудной части шихты, обеспечили повышение показателя равномерности  $K_{ЖРС}$  с 0,30 до 0,62 установлением режима загрузки добавочных материалов на дно скипа. Это сопровождалось уменьшением коэффициента окружной неравномерности распределения температур  $p_t$  с 0,51 до 0,46. В периоде III, вернув режим «добавки наверх» и разделив в системе загрузки агломерат на две части – добавочный 17% и основной 83%, обеспечили следующую последовательность набора материалов в скип: вниз 83% агломерата от его расхода, затем кварцит, фракция, окатыши и оставшиеся 17% агломерата. Величина показателя равномерности увеличилась с 0,62 до 0,76, что обеспечило снижение  $p_t$  с 0,46 до 0,38. В среднем для доменной

печи № 4 при уменьшении  $K_{ЖРС}$  на каждые 0,1 в интервале 0,30-0,76 наблюдали уменьшение величины  $p_t$  на 0,028, снижение градиента температур газа на периферии в шахте печи, под газоотводами и в газоотводах соответственно на 8,3; 4,6 и 1,0 °С (см. таблицу 3.7). Уменьшение коэффициента неравномерности в периодах II и III по сравнению с периодом I сопровождалось улучшением технико-экономических показателей работы печи № 4 согласно таблице 3.8.

Таблица 3.7 – Параметры колошникового газа и дутья в исследуемые периоды

Наименование показателей	Коэффициент окружной неравномерности распределения температур $p_t$			
	0,51	0,46	0,38	
Состав колошникового газа, %:	CO <sub>2</sub>	21,5	21,4	21,8
	CO	23,7	23,4	23,4
	H <sub>2</sub>	8,9	8,8	8,6
Температура газа, °С:				
в газоотводах	144	138	128	
на периферии под газоотводами	146	139	134	
на периферии в шахте	341	341	328	
Градиент температуры газа, °С:				
в газоотводах	6,6	3,6	2,2	
на периферии под газоотводами	75	64	54	
на периферии в шахте	243	237	205	
Давление колошникового газа, кПа	141,8	139,5	142,3	
Расход: дутья, м <sup>3</sup> /мин	2705	2712	2717	
природного газа, тыс. м <sup>3</sup> /ч	15,5	15,7	15,9	
Давление горячего дутья, кПа	267,7	261,4	264,2	
Температура дутья, °С	1177	1184	1188	
Расход водяного пара, г/м <sup>3</sup>	5,9	3,67	5,6	
Содержание кислорода, %	28,0	27,8	27,7	

Таблица 3.8 – Основные технологические показатели работы доменной печи № 4

Наименование показателей	Коэффициент окружной неравномерности распределения температур $p_t$		
	0,51	0,46	0,38
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна:			
фактический	456,7	455,6	455,1
приведенный к условиям базового периода	-	455,9	451,7
Производительность, т/сут:			
по фактическому количеству загруженных подач	3611	3647	3618
приведенная к условиям базового периода	-	3666	3696
Расход сырьевых материалов, кг/т чугуна	1691	1690	1703
Доля окатышей от ЖРС, %	30	30	28
Содержание Fe в шихте, %	57,4	57,5	57,0

### 3.2.1.1 Газодинамический режим печи

На доменной печи № 4 ПАО «ММК» понижение коэффициента окружной неравномерности распределения температур с 0,51 до 0,46, достигнутой путем смены режима загрузки с «добавки наверх скипа» на «добавки на дно скипа», сопровождалось снижением коэффициента сопротивления шихты движению газового потока в верхней части печи на 3%. При повышении окружной равномерности распределения материалов загрузкой окатышей в слой агломерата (величина  $p_t$  уменьшилась с 0,46 до 0,38) наблюдали увеличение сопротивления шихты движению газового потока в верхней части печи, на что указывает рост коэффициента на 6,5% (таблица 3.9).

Таблица 3.9 – Показатели газодинамического режима доменной печи № 4

Наименование показателей	Коэффициент окружной неравномерности распределения температур $p_t$		
	0,51	0,46	0,38
Степень уравнивания шихты подъёмной силой газового потока, %	49,5	48,2	48,6
Скорость газа на пустое сечение печи в рабочих условиях по температуре и давлению, м/с:			
в верхней части печи	1,44	1,43	1,38
в нижней части печи	1,20	1,18	1,20
Динамический напор газа на пустое сечение печи в рабочих условиях по температуре и давлению, Н/м <sup>2</sup> :			
в верхней части печи	1,99	1,96	1,76
в нижней части печи	0,74	0,73	0,74
Коэффициент сопротивления шихты движению газа:			
в верхней части печи	0,32	0,31	0,33
в нижней части печи	8,1	7,9	8,2

В результате понижения коэффициента неравномерности распределения температур по окружности печи в периоде III по сравнению с периодом I снизилась скорость газа в верхней части печи с 1,44 до 1,38 м/с и уменьшился динамический напор газа с 1,99 до 1,76 Н/м<sup>2</sup>.

В среднем для доменных печей № 4, 6 и 9 ПАО «ММК» понижение коэффициента неравномерности распределения температур по окружности печи на 41% путем перехода с режимов загрузки добавки на дно или наверх бункера БЗУ на режим загрузки, обеспечивающий размещение добавочных материалов в слое агломерата, сопровождался ростом коэффициента сопротивления шихты движению газового потока в верхней части печи на 5,1%. Это приводило к уменьшению скорости газа в низкотемпературной зоне на 3,1%, снижению динамического напора газа на 4,44 %.

Понижение коэффициента окружной неравномерности на 40,3% переходом с режима загрузки добавки наверх скипа на добавки на дно скипа на доменных печах № 4, 6 и 9 ПАО «ММК» обеспечивало уменьшение

коэффициента сопротивления шихты движению газового потока на 1,02% (таблица 3.10). Это является результатом перераспределения материалов по радиусу, поскольку согласно физическому моделированию (см. главу 2) наряду с повышением окружной неравномерности излишне раскрывается центр печи.

Таблица 3.10 – Изменение показателей газодинамического режима (% отн.) доменных печей № 4, 6, 9 при смене режима загрузки добавочных материалов в бункер БЗУ

Наименование показателей	Изменение режима загрузки добавочных материалов в бункер БЗУ		
	низ→ слой	низ→ верх	верх→ слой
Изменение степени уравнивания шихты подъёмной силой газового потока	-5,16	-3,17	-0,66
Изменение скорости газа в рабочих условиях по температуре и давлению: в верхней части печи в нижней части печи	-3,96	-1,17	-2,18
	-1,42	-0,52	0,17
Изменение динамического напора газа в рабочих условиях по температуре и давлению: в верхней части печи в нижней части печи	-5,25	-1,15	-3,63
	-3,24	-1,32	-0,74
Изменение коэффициента сопротивления шихты движению газа: в верхней части печи в нижней части печи	4,93	-1,02	5,19
	5,01	0,44	-4,43

Увеличенное количество газов, проходящих через центральную часть печи, частично скомпенсировало ухудшение газопроницаемости слоя шихты, полученной в результате увеличения равномерности распределения шихтовых материалов по окружности колошника. В результате скорость газового потока и динамический напор газа в верхней части печи уменьшились всего лишь на 1,17 и 0,52% соответственно, что меньше, чем при переходе на режим загрузки, предполагающий размещение добавочных материалов в слое агломерата.

В среднем для доменных печей № 4, 6 и 9 уменьшение коэффициента окружной неравномерности распределения материалов и газов на 40,7%

сопровождалось понижением степени уравнивания шихты подъёмной силой газового потока на 3,0 %, что являлось результатом повышения равномерности распределения рудной нагрузки при уменьшении выхода фурменного газа и снижении скорости газа в опытных периодах по сравнению с базовыми.

### 3.2.1.2 Интенсивность по дутью, газу и шихтовым материалам

При повышении равномерности распределения материалов по окружности колошника создавались условия, позволяющие работать доменным печам с более высокой интенсивностью по сырью. На доменной печи № 4 снижение коэффициента окружной неравномерности с 0,51 в периоде I до 0,46 и 0,38 соответственно в периодах II и III сопровождалось ростом интенсивности по сырью с 4340 соответственно до 4385 и 4398 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> в минуту (таблица 3.11). В результате в опытных периодах наблюдали повышение производства чугуна и шлака. В периоде III по сравнению с периодом I увеличилась интенсивность накопления продуктов плавки в горне печи с 0,872 до 0,901 м<sup>3</sup>·мин, повысилась интенсивность орошения кокса продуктами плавки с 2,961 до 3,022 т/т, выросла степень заполнения продуктами плавки межкусковых пустот кокса с 79,1 до 82,0%.

Из-за повышенной интенсивности по сырью и более равномерному распределению материалов по окружности колошника в условиях загрузки окатышей в слой агломерата в периоде III по сравнению с периодом I наблюдали понижение интенсивности по колошниковому и фурменному газам, также интенсивности по газу в распаре и шахте печи. Так, интенсивность по колошниковому газу в периоде III по сравнению с периодом I уменьшилась с 3,197 до 3,151 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> в минуту, в шахте уменьшение интенсивности по газу составило 0,045 м<sup>3</sup>/(м<sup>3</sup>·мин). Напротив, понижение коэффициента окружной неравномерности распределения температур с 0,51 до 0,46 за счет смены режима загрузки с «добавки наверх скипа» на «добавки на дно скипа» привело

к раскрытию центральной зоны печи, что сопровождалось увеличением интенсивности газового потока по высоте печи.

Таблица 3.11 – Показатели интенсивности доменной печи № 4

Наименование показателей	Коэффициент окружной неравномерности распределения температур $p_t$		
	0,51	0,46	0,38
Производство чугуна и шлака на 1 м <sup>3</sup> объёма печи, т/сут	3,668	3,710	3,730
Интенсивность по сырью, кг/(м <sup>3</sup> ·сут)	4340	4385	4398
Интенсивность хода по дутью, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> в минуту	1,945	1,953	1,893
Интенсивность по газу, м <sup>3</sup> /(м <sup>3</sup> ·мин):			
колошниковому	3,197	3,210	3,151
фурменному	2,881	2,898	2,840
в распаре	2,995	3,011	2,953
в шахте	3,092	3,106	3,047
Интенсивность накопления продуктов плавки в горне, м <sup>3</sup> ·мин	0,872	0,884	0,901
Степень заполнения продуктами плавки межкусковых пустот кокса, %	79,1	79,9	82,0
Интенсивность орошения кокса продуктами плавки, т/т	2,961	2,986	3,022

В среднем для трех доменных печей изменение показателей интенсивности приведено в таблице 3.12. Наибольшее снижение интенсивности по газу наблюдали при переходе на режим загрузки окатышей в слой агломерата. В среднем при переходе с режимов загрузки «добавки наверх скипа» или «добавки на дно скипа» на режим загрузки окатышей между слоями агломерата, сформированными в количестве 20 и 80%, располагающимися соответственно под и над окатышами, уменьшение интенсивности по газу составило 2,3%. В условиях перехода с режима загрузки «добавки наверх скипа» на «добавки на дно скипа» интенсивность по газу увеличилась на 0,18%.

Таблица 3.12 – Изменение показателей интенсивности (% отн.) доменных печей № 4, 6, 9 при смене режима загрузки добавочных материалов в бункер БЗУ

Наименование показателей	Изменение режима загрузки добавочных материалов в бункер БЗУ		
	низ→ слой	низ→ верх	верх→ слой
Изменение производства чугуна и шлака на 1 м <sup>3</sup> объёма печи	1,95	1,34	1,04
Изменение интенсивности по сырью	1,88	1,42	0,89
Изменение интенсивности хода по дутью	-3,04	-0,95	-2,09
Изменение интенсивности по газу:			
колошниковому	-1,84	0,14	-1,94
фурменному	-3,06	0,42	-2,38
в распаре	-2,47	0,14	-2,16
в шахте	-2,22	0,03	-2,07
Изменение интенсивности накопления продуктов плавки в горне	2,31	1,22	2,28
Изменение степени заполнения продуктами плавки межкусковых пустот кокса	1,62	0,34	2,56
Изменение интенсивности орошения кокса продуктами плавки	1,27	0,63	1,31

### 3.2.1.3 Восстановление железа из оксидов

Повышение равномерности распределения материалов при уменьшении скорости газового потока в периодах II и III по сравнению с периодом I сопровождалось увеличением химической степени использования монооксида углерода и водорода. На доменной печи № 4 понижение коэффициента окружной неравномерности с 0,51 в периоде I до 0,46 в периоде II и 0,38 в периоде III сопровождалось повышением степени использования H<sub>2</sub> с 31,5 соответственно до 32,2 и 33,6% (таблица 3.13). Степень использования CO в периодах II и III увеличилась соответственно на 0,2 и 0,6% абс. по сравнению с периодом I. В среднем для доменных печей № 4, 6, 9 ПАО «ММК» уменьшение

коэффициента окружной неравномерности распределения температур на 40,3% сопровождалось повышением степени использования CO на 0,91 % отн. и H<sub>2</sub> 1,15 % отн. (таблица 3.14).

Таблица 3.13 – Показатели хода восстановления в доменной печи № 4

Наименование показателей	Коэффициент окружной неравномерности распределения температур $p_t$		
	0,51	0,46	0,38
Степень восстановления Fe из FeO различными восстановителями, %:			
углеродом	34,0	33,1	32,9
монооксидом углерода	48,2	48,6	48,9
водородом	17,8	17,9	18,1
Степень использования газа-восстановителя, %:			
CO	47,6	47,8	48,2
H <sub>2</sub>	31,5	32,2	33,6
Соотношение степеней использования H <sub>2</sub> и CO	0,66	0,67	0,70

Таблица 3.14 – Изменение показателей хода восстановления (% отн.) в доменных печах № 4,6,9 при смене режима загрузки добавочных материалов в бункер БЗУ

Наименование показателей	Изменение режима загрузки добавочных материалов в бункер БЗУ		
	низ→ слой	низ→в ерх	верх→ слой
Изменение степени восстановления Fe из FeO различными восстановителями, %:			
C	-3,52	-2,51	-1,10
CO	1,63	0,91	0,92
H <sub>2</sub>	1,89	1,15	1,48
Изменение степени использования газа-восстановителя:			
CO	1,32	0,54	2,61
H <sub>2</sub>	5,01	2,50	4,30
Изменение соотношения степеней использования H <sub>2</sub> и CO	5,41	0,52	3,48

Уменьшение интенсивности по газу на доменных печах № 4, 6 и 9 ПАО «ММК» в семи парных периодах вследствие повышения равномерности распределения материалов по окружности печи при переходе с режимов загрузки добавочных материалов «на дно» и «наверх» бункера БЗУ на их размещение в слое агломерата сопровождалось смещением процессов восстановления в верхнюю ее часть. На это указывает уменьшение степени восстановления Fe из FeO углеродом на 2,3% отн. при повышении водородом и монооксидом углерода соответственно на 1,7 и 1,28% отн. в среднем для условий понижения величины  $p_t$  на 41%.

### 3.2.1.4 Тепловая работа печи по зонам

Понижение коэффициента окружной неравномерности распределения температур в результате повышения равномерности распределения материалов в колошниковом пространстве печи сопровождалось увеличением интенсивности теплообмена в нижней части печи и понижением в верхней. На это указывает изменение соотношений теплоёмкостей потоков шихты и газа (таблица 3.15).

Таблица 3.15 – Показатели тепловой работы доменной печи № 4

Наименование показателей	Коэффициент окружной неравномерности распределения температур $p_t$		
	0,51	0,46	0,38
Соотношение теплоёмкостей потоков шихты и газа: в нижней части печи (с температурами более 850 °С)	2,003	2,006	2,046
в верхней части печи (с температурами менее 850 °С)	0,851	0,858	0,870
Суммарный расход тепла на проведение всех процессов в определяющей зоне, МДж/т чугуна	2151	2190	2260
Потери тепла в определяющей зоне, %	27,5	27,0	25,3
Протяженность верхней ступени теплообмена, м	4,57	4,51	4,45
Протяженность нижней ступени теплообмена, м	2,95	2,92	2,91

На доменной печи № 4 ПАО «ММК» уменьшение окружной неравномерности с 0,51 до 0,46 за счет смены режима загрузки с «добавки наверх скипа» на «добавки на дно скипа» сопровождалось увеличением соотношения теплоёмкостей потоков шихты и газа в нижней и верхней частях печи соответственно от 2,003 до 2,006 и 0,851 до 0,858. Дальнейшее уменьшение величины  $p_t$  в периоде III по сравнению с периодом II с 0,46 до 0,38 путем размещения окатышей и добавочных материалов между слоями агломерата, сформированных в количестве 17 и 83% от его расхода, располагающимися соответственно под и над окатышами, сопровождалось дальнейшим увеличением соотношений теплоёмкостей потоков шихты и газа с 2,006 до 2,046 в зоне с температурами более 850 °С и с 0,858 до 0,870 °С в зоне с температурами менее 850 °С (см. таблицу 3.15).

В среднем для трех доменных печей изменение показателей тепловой работы приведено в таблице 3.16.

Таблица 3.16 – Изменение показателей тепловой работы (% отн.) доменных печей № 4, 6, 9 при смене режима загрузки добавочных материалов в бункер БЗУ

Наименование показателей	Изменение режима загрузки добавочных материалов в бункер БЗУ		
	низ→ слой	низ→ верх	верх→ слой
Изменение соотношения теплоёмкостей потоков шихты и газа:			
в нижней части печи (с температурами более 850 °С)	1,94	0,26	1,52
в верхней части печи (с температурами менее 850 °С)	1,67	0,34	0,83
Изменение суммарного расхода тепла на проведение всех процессов в определяющей зоне	2,3	1,47	1,91
Изменение потери тепла в определяющей зоне	7,2	2,8	4,1
Изменение протяженности верхней ступени теплообмена	-1,75	-0,43	-1,20
Изменение протяженности нижней ступени теплообмена	-0,92	-0,51	-0,53

Наиболее интенсивное увеличение теплообмена для условий работы доменных печей № 4, 6 и 9 ПАО «ММК» наблюдали в условиях перехода на режимы загрузки, предполагающие расположение окатышей в слое агломерата, что обеспечивает повышение равномерности распределения материалов по окружности и радиусу печи и, следовательно, равномерное распределение температурного интервала плавления железорудных материалов в нижней части печи (см. главу 4). Повышение равномерности распределения материалов по окружности печи сопровождалось увеличением высоты зоны замедленного теплообмена за счет сокращения верхней и нижней ступеней интенсивного теплообмена, что обеспечивало повышение тепловой и химической энергии газового потока и, как результат, – снижение удельного расхода кокса.

### **3.2.2 Зависимость между показателями хода процессов и равномерностью поступления коксового орешка из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи**

Для стабильной работы доменной печи, использующей в составе шихты коксовый орешек, увеличения допустимого по ходу доменной плавки его потребления и коэффициента замены им металлургического кокса, целесообразно равномерное его распределение по окружности колошника доменной печи. Это может обеспечиваться синхронизацией поступления орешка из шихтового бункера на вращающийся лоток БЗУ по отношению к другим материалам. При загрузке его с относительно небольшим расходом совместно с агломератом и окатышами возникают сложности в обеспечении постоянства соотношения между всеми компонентами при поступлении из шихтового бункера. Неравномерность поступления приводит к различию газопроницаемости шихты по секторам, отклонению распределения газа по сечению от оптимального и к неполному его расходованию до зоны вязко-пластичного состояния материалов, что ухудшает фильтрацию жидких продуктов плавки через слой коксовой насадки.

На доменных печах объемом 1370 м<sup>3</sup> ПАО «ММК» исследовали влияние равномерности поступления коксового орешка из бункера БЗУ в колошниковое

пространство на ход плавки [459-461]. На доменных печах № 4 и 2 эксперимент разделили на три периода для каждой из печей, которые отличались друг от друга режимом набора материалов в скип. На печи № 4 в бункере БЗУ размещали 1 скип. На доменной печи № 2 исследовали двухскиповую загрузку компонентов шихты в бункер БЗУ.

В периоде I в среднем рудном скипе, обозначенном как  $P_{op}$  в матрице загрузки (таблица 3.17), материалы располагали следующим образом: на дно высыпали агломерат, затем кварцит, руду, окатыши и орешек. Данную загрузку обеспечили режимом «добавки наверх». Такая очередность загрузки материалов в скип обеспечивала размещение коксового орешка в нижней части бункера БЗУ, что согласно физическому моделированию (см. главу 2) соответствовало показателю равномерности поступления его на лоток, рассчитанному по формуле (2.2).

Таблица 3.17 – Матрицы загрузки доменных печей № 4 и 2 в исследуемые периоды (К – кокс, Р – железорудная часть шихты)

Вид материала для ДП № 4	Количество оборотов лотка по станциям 1-11 и порциям материалов К, Р на доменных печах																				Вид материала для ДП № 2	
	4										2											
	1	1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	1	1	9	8	7	6	5	4	3		2
К			1	1	1										1	1	2	1	1			К
К				1	1		1												1		2	К
К						1		1	1					1	1	1	1	1	1			Р
Р	1	1	1												1	1	1	1	1	1		К
$P_{op}$		1	1	1										2	1	1	1	1				Р
Р					1	1	1								1	1	1	2	1			К
К			1	1	1								1	1	1	1	1	1				Р
К				1	1		1								1	1	2	1	1			К
К						1		1	1										1		2	К
К									1	1				1	1	1	1	1	1			Р
Р	1	1	1												1	1	1	1	1	1		К
$P_{op}$		1	1	1										2	1	1	1	1				Р
Р					1	1	1								1	1	1	2	1			К
-														1	1	1	1	1	1			Р

В периоде II исследовали режим загрузки «добавки на дно». Расположив орешек в ближнем к печи бункере, добились его поступления да дно скипа. Следом за ним поступали кварцит, руда, окатыши и агломерат. При ссыпании содержимого скипа в бункер БЗУ орешек располагался последним. Коэффициент равномерности в этом случае составил 0,13.

В периоде III, вернув режим «добавки наверх», поместили орешек в середину объема шихтовых материалов. Первым в скип поступало 83% агломерата от его расхода, следом кварцит с рудой, орешек, окатыши и оставшееся количество агломерата. Загрузка коксового орешка в такой последовательности обеспечивала наиболее приемлемую величину коэффициента равномерности, равную 0,74.

В периодах IV-VI расположение коксового орешка в рудных скипах соответствовало его размещению в периодах I-III, соответственно, загрузка его в скип последним, первым и в слой железорудного сырья. Режим загрузки материалов «вперемешку» в периодах IV и V обеспечивал смесь агломерата и окатышей при размещении их в скипе. В периоде VI, так же как и в периоде III, расположение коксового орешка между слоями железорудного сырья обеспечили режимом загрузки «добавки наверх». Таким образом, двухскиповое размещение компонентов шихты в бункере БЗУ обеспечивало размещение коксового орешка в бункере следующим образом: в периоде IV – в нижней части бункера и в среднем слое материалов, в периоде V – в среднем слое железорудных материалов и над ними, в периоде VI – обе порции коксового орешка располагались в слое железорудного сырья. При этом согласно физическому моделированию коэффициент равномерности в периодах IV-VI был следующий: (-0,45); 0,49 и 0,66 соответственно.

Анализ характера распределения коксового орешка по ходу выпуска при односкиповой и двухскиповой загрузке (см. главу 2, рисунки 2.24 и 2.25) показывает, что большая часть орешка покидает бункер БЗУ в последнюю очередь, что связано с наименьшей насыпной плотностью его по сравнению с другими компонентами шихты. Таким образом, изменение последовательности

загрузки компонентов шихты наряду с варьированием коэффициента равномерности предполагает различное расположение коксового орешка по радиусу колошника. В периоде I в условиях работы печи на матрице, представленной в таблице 3.17, коксовый орешек преимущественно выгружали со станции углового положения лотка № 10, то есть помимо неравномерного его распределения по окружности печи он еще преимущественно располагался в периферийной части печи. В периодах II и III его выгружали со станций углового положения лотков № 9, 8, что лучше для эффективного его использования по реакции Белла-Будуара. В периоде IV, так же как и в периоде I, коксовый орешек поступал преимущественно в пристеночную часть печи. В периодах V-VI коксовый орешек в большей степени размещали в зоне рудного гребня.

В каждом периоде анализировали дренажную способность горна с использованием следующих показателей:

- количество шлака, остающегося в горне после выпуска;
- интервал времени от начала выпуска до появления шлака;
- вязкость шлака;
- коэффициент сопротивления шихты движению газов в нижней части печи.

Количество остающегося в печи шлака определили по формулам [462]:

$$\Delta V = \frac{1}{1,25} \sqrt{\sigma_V^2 - q_{VT}^2 - \sigma_T^2}, \quad (3.7)$$

$$\Delta V = \frac{1}{1,25} \sqrt{\sigma_V^2 - q_{VN}^2 - \sigma_N^2}, \quad (3.8)$$

где  $\sigma_V$ ,  $\sigma_T$ ,  $\sigma_N$  – среднеквадратические отклонения числа ковшей шлака по выпускам, продолжительности цикла от начала одного выпуска до начала следующего, мин, количества взятых за цикл подач соответственно;

$q_{VT}$  – среднее количество шлака, образующегося в печи за одну минуту, в ковшах;

$q_{VN}$  – среднее количество шлака, образующегося из одной подачи, в ковшах;

1,25 – коэффициент перевода среднеквадратического отклонения в абсолютное (среднеарифметическое).

Вязкость шлака  $\eta_{ш}$  оценили по степени приближения фактического коэффициента распределения серы между чугуном и шлаком к равновесной величине, используя формулу Куликова И.С [463], преобразованную в вид:

$$\lg \eta_{ш} = K \cdot \frac{2,08 - \lg \eta_{L_s}}{0,87} - 1, \quad (3.9)$$

где  $K$  – коэффициент, учитывающий условия работы печи;

$\eta_{L_s}$  – степень приближения фактического коэффициента распределения серы между чугуном и шлаком к равновесной величине, определяемая по формуле

$$\eta_{L_s} = \frac{L_s}{L_s^o} \cdot 100, \quad (3.10)$$

где  $L_s, L_s^o$  – фактический и равновесный коэффициенты распределения серы.

Фактический коэффициент распределения серы рассчитывается по следующей формуле:

$$L_s = \frac{(S)}{[S]}, \quad (3.11)$$

где  $(S)$  – содержание серы в шлаке;  $[S]$  – содержание серы в чугуне.

Равновесный коэффициент распределения серы определяли по формуле И.С. Куликова:

$$\lg L_s^o = 2,55 \cdot B_{об} - 2,07 + \lg \frac{f_{[S]}}{P_{CO}}, \quad (3.12)$$

где  $\lg f_{[S]} = 0,11 \cdot C_{эКВ} + 0,006 \cdot C_{эКВ}^2$ , (3.13)

$$C_{эКВ} = [C] + 0,63[Si] + 0,4[P] - 0,23[Mn] - 0,27[S], \quad (3.14)$$

Парциальное давление газа вычислили из следующей формулы:

$$P_{CO} = 0,01 \cdot CO_{\phi} \cdot (P_{д} + 0,8), \quad (3.15)$$

где  $P_d$  – давление горячего дутья, Па;

$CO_{\Phi}$  – содержание CO в фурменном газе.

Коэффициент сопротивления шихты рассчитали по следующим зависимостям [427]:

$$\lambda_{шв} = \frac{(2 \cdot P_{кг} + \Delta P_B) \cdot \Delta P_B}{V_d^{m_{верх}}}, \quad (3.16)$$

$$\lambda_{шн} = \frac{(2 \cdot P_d - \Delta P_H) \cdot \Delta P_H}{V_d^{m_{низ}}}, \quad (3.17)$$

где  $\lambda_{шв}$  – коэффициент сопротивления шихты в верхней части печи;

$\lambda_{шн}$  – коэффициент сопротивления шихты движению газа в нижней части печи;

$V_d$  – расход холодного дутья на 1 м<sup>3</sup> полезного объема печи, м<sup>3</sup>/ч;

$m$  – показатель, учитывающий режим движения газового потока (для верхней части печи  $m_{верх} = 1,9$ , для всей нижней части печи  $m_{общ} = 1,7$ );

$P_{кг}$  – давление колошниковога газа, кПа;

$P_{сш}$  – давление газа в середине шахты, кПа;

$P_d$  – давление горячего дутья, кПа;

$\Delta P_H$  – нижний перепад давления, кПа.

Результаты исследований режимов загрузки коксового орешка в колошниковое пространство доменных печей № 4 и 2 ПАО «ММК» приведены в таблицах 3.18-3.23.

Повышение показателя равномерности поступления коксового орешка из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи сопровождалось снижением неравномерности распределения газов по окружности печи, на что указывает снижение коэффициента неравномерности распределения температур  $p$  периферийных газов по окружности колошника (таблица 3.18). В среднем для двух печей окружная неравномерность распределения температур в шахте уменьшилась на 12,2%. Рассредоточение коксового орешка по окружности

колошника сопровождалось улучшением фильтрующей способности коксовой насадки в горне доменных печей № 4 и 2. На это указывают изменение показателей, характеризующих дренажную способность горна, – уменьшилось количество шлака, остающегося в горне печи, понизилась вязкость шлака, рассчитанная по степени приближения фактического коэффициента распределения серы между чугуном и шлаком к равновесной величине, снизился коэффициент сопротивления шихты движению газового потока в нижней части печи (таблицы 3.19, 3.21).

Таблица 3.18 – Показатели окружной неравномерности распределения материалов и газов

Показатели	Доменная печь					
	№4			№2		
	Показатель равномерности поступления орешка из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи при физическом моделировании					
	-1,2	0,13	0,74	-0,45	0,49	0,66
Периоды	I	II	III	IV	V	VI
Размещение коксового орешка в бункере БЗУ	низ	верх	середина	низ	верх	середина
Количество скипов в бункере БЗУ	1			2		
$X_{кор}^2 = \chi_k^2$ статистика	5,0	4,7	4,0	8,2	7,2	5,0
Коэффициент окружной неравномерности распределения температур $p$	0,83	0,80	0,74	0,96	0,93	0,83

Согласно таблице 3.19 на доменной печи № 4 в периоде II по сравнению с периодом I уменьшилось количество шлака, остающегося в горне печи с 18,1 до 17,5 т, снизилась расчетная вязкость шлака с 0,56 до 0,54 Па·с. Понизился коэффициент сопротивления шихты движению газов в нижней части печи на 4,9% отн. (таблица 3.20).

Снижение газодинамической напряженности в верхних частях доменных печей № 2 и 4 является результатом повышения коэффициента равномерности распределения коксового орешка по окружности печи и выгрузка его в

колошниковом пространстве со станций углового положения лотка № 9, 8 на печи № 4 и в зону рудного гребня на печи № 2, вместо станции № 10. Повышенная концентрация газов СО в этой зоне обеспечивала более эффективное использование кокса мелких фракций по реакции  $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$ . Это сопровождалось повышением степени восстановления Fe из FeO газом СО с 29,8 до 31,1% абс. на печи № 4 в периоде II по сравнению с периодом I и с 34,2 до 35,7% абс. на печи № 2 в периоде V по сравнению с периодом IV (таблица 3.21) и, следовательно, увеличением степени использования СО на 0,3 и % абс.

Таблица 3.19 – Показатели дренажной способности коксовой насадки в горне доменных печей № 4 и 2

Показатели	Показатель равномерности поступления орешка из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи при физическом моделировании					
	-1,2	0,13	0,74	-0,45	0,49	0,66
Расход коксового орешка (сухого), кг/т чугуна	18,1	18,3	18,3	9,9	10,1	10,2
Длительность периода, сут	7	7	7	8	8	7
Количество шлака, остающегося в горне, т	18,1	17,5	16,0	18,9	18,1	17,9
Расчетная вязкость шлака по степени приближения фактического коэффициента распределения серы между чугуном и шлаком к равновесной величине, Па·с	0,56	0,54	0,52	0,48	0,47	0,46
Время от начала выпуска до появления шлака, мин:						
на летке 1	13	12	13	18	15	14
на летке 2	16	17	16	14	16	15

Влияние повышения коэффициента равномерности распределения коксового орешка по окружности печи при сохранении позиции его размещения по радиусу колошника можно представить сравнением периодов II с III на печи № 4 и VI с V на печи № 2. Сохранение распределения коксового

орешка в колошниковом пространстве печи со станций углового положения лотка № 9, 8 в периоде III по сравнению с периодом II при повышении коэффициента равномерности его поступления из бункера БЗУ с 0,13 до 0,74 и рост его величины с 0,49 до 0,66 на печи № 2 в периоде VI по сравнению с периодом V в условиях поступления коксового орешка в зону рудного гребня сопровождалось улучшением показателей дренажной способности горна печи, повышением степени восстановления Fe и FeO монооксидом углерода при понижении углеродом (см. таблица 3.21).

Таблица 3.20 – Показатели интенсивности и сопротивления шихты

Показатели	Показатель равномерности поступления орешка из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи при физическом моделировании					
	-1,2	0,13	0,74	-0,45	0,49	0,66
Интенсивность по газу, м <sup>3</sup> в минуту на 1 м <sup>3</sup> полезного объема печи: колошниковому	3,57	3,57	3,58	2,76	2,82	3,77
фурменному	3,22	3,22	3,23	2,46	2,52	2,45
в распаре	3,35	3,35	3,37	2,57	2,63	2,57
в шахте	3,44	3,45	3,47	2,66	2,72	2,66
Коэффициент сопротивления шихты движению газов:						
на колошнике	1,4	1,3	1,3	1,9	1,8	1,8
в распаре	9,8	9,6	9,1	11,9	11,7	11,4
в горне	6,1	5,8	5,6	6,6	6,5	6,4
Скорость газа на пустое сечение печи в рабочих условиях по температуре и давлению, м <sup>3</sup> /с: на колошнике	1,74	1,80	2,17	1,19	1,22	1,20
в распаре	1,66	1,76	2,02	1,45	1,50	1,49
в горне	2,51	2,7	3,10	2,29	2,37	2,33
Динамический напор газа на пустое сечение печи в рабочих условиях по температуре и давлению, Н/м <sup>2</sup> : на колошнике	2,24	2,51	3,22	1,39	1,46	2,42
в распаре	1,05	1,2	1,46	0,78	0,84	0,81
в горне	1,33	1,55	1,92	1,04	1,11	1,06

Таблица 3.21 – Показатели хода восстановления Fe из FeO

Показатели	Показатель равномерности поступления орешка из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи при физическом моделировании					
	-1,2	0,13	0,74	-0,45	0,49	0,66
Степень восстановления Fe из FeO различными восстановителями, %:						
углеродом	40,2	39,1	37,3	39,2	37,7	37,1
монооксидом углерода	29,8	31,1	32,4	34,2	35,7	36,2
водородом	30,0	29,8	30,3	26,6	26,6	26,7
Степень использования газа-восстановителя, %:						
CO	44,2	44,5	44,6	43,5	43,8	44,6
H <sub>2</sub>	42,8	42,8	43,0	34,2	34,0	34,3

Таблица 3.22 – Показатели тепловой работы печей по периодам

Показатели	Показатель равномерности поступления орешка из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи при физическом моделировании					
	-1,2	0,13	0,74	-0,45	0,49	0,66
Соотношение теплоёмкостей потоков шихты и газа:						
в нижней части печи (с температурами более 850 °С)	1,739	1,760	1,790	1,964	2,020	2,054
в верхней части печи с температурами менее 850 °С)	0,740	0,731	0,697	0,867	0,863	0,863
Суммарный расход тепла на проведение всех процессов в определяющей зоне, МДж/т чугуна	2878	2749	2736	3050	2928	2927
Потери тепла в определяющей зоне, %	26,7	26,1	26,8	26,9	23,5	21,8
Протяженность верхней ступени теплообмена, м	4,27	4,36	4,46	4,11	4,22	4,25
Протяженность нижней ступени теплообмена, м	3,59	3,26	3,22	2,58	2,54	2,45

Увеличение равномерности поступления орешка из бункера в периодах III и VI по сравнению с периодами II и V соответственно сопровождалось повышением интенсивности по газу и ростом динамического напора газа (см. таблицу 3.20), что в соответствии с зависимостью (3.18) уменьшало величину коэффициента сопротивления шихты в верхней части печи:

$$\lambda = h / h_{\text{д}}, \quad (3.18)$$

где  $h$  – потери напора газа;

$h_{\text{д}}$  – динамический напор газа.

Улучшение газопроницаемости в верхней части печи сопровождалось повышением интенсивности теплообмена в зоне с температурами менее 850<sup>0</sup>С, на что указывает уменьшение соотношения теплоёмкостей потоков шихты и газа в верхней части печи (с температурами менее 850<sup>0</sup>С) с 0,740 до 0,697 в периоде III по сравнению с периодом I и с 0,867 до 0,863 в периоде VI по сравнению с периодом IV (см. таблицу 3.22).

Смещение процессов восстановления и теплообмена в верхнюю часть печи сопровождалось увеличением протяженности верхней ступени теплообмена и уменьшением нижней. Суммарный расход тепла на проведение всех процессов в определяющей зоне снизился в периодах III и VI по сравнению с периодами I и IV соответственно на 4,9 и 4,1 %.

Снижение газодинамической напряженности в верхней и нижней частях печи вследствие повышения газопроницаемости и улучшения дренажной способности коксовой насадки в горне печи сопровождалось ростом технико-экономических показателей плавки. Производительность доменной печи № 4 выросла на 20 т/сут при понижении удельного расхода кокса, приведенного к условиям базового периода, на 5,4 кг/т чугуна в периоде III по сравнению с периодом I. Коэффициент замены кокса коксовым орешком увеличился с 0,68 в периоде I до 0,88 кг/кг в периоде III (см. таблицу 3.23).

Таблица 3.23 – Основные технологические показатели работы  
доменных печей № 4 и 2

Показатели	Показатель равномерности поступления орешка из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи при физическом моделировании					
	-1,2	0,13	0,74	-0,45	0,49	0,66
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна:						
фактический	449,3	448,5	445,1	471,7	475,7	472,4
приведенный к условиям базового периода	-	448,2	443,9	-	469,1	468,2
Коэффициент замены кокса коксовым орешком, приведенный к условиям базового периода, кг/кг	0,68	0,72	0,88	0,68	0,85	0,91
Производительность, т/сут:						
по фактическому количеству загруженных подач	3472	3490	3510	3150	3165	3177
приведенная условиям базового периода	-	3485	3492	-	3203	3212
Расход, м <sup>3</sup> /т чугуна:						
дутья	1180	1183	1182	1374	1404	1372
природного газа	115,5	115,4	115,4	88,4	79,3	83,5
Содержание O <sub>2</sub> в дутье, %	27,5	27,5	27,6	27,0	26,1	27,0
Расход сырьевых материалов, кг/т чугуна	1730	1743	1736	1641	1631	1642
Содержание Fe в шихте, %	57,5	56,9	57,3	57,35	58,05	57,88
Содержание в чугуне, %:						
Si	0,70	0,71	0,69	0,72	0,76	0,81
Mn	0,29	0,29	0,29	0,28	0,26	0,24
S	0,022	0,021	0,021	0,021	0,024	0,029
C	4,62	4,62	4,60	4,69	4,56	4,53
Основность шлака	0,997	0,698	0,984	1,02	1,00	0,989

Использование двухскиповой загрузки железорудных материалов в бункер БЗУ на доменной печи № 2 при распределении компонентов железорудной части шихты на станции углового положения лотка № 9-4 позволяло выгружать

коксовый орешек в зону рудного гребня, что наряду с увеличением коэффициента равномерности распределения его по окружности печи с -0,45 до 0,66 позволило обеспечить повышение коэффициента замены кокса орешком с 0,68 до 0,91 кг/кг при повышении производительности печи на 62 т/сут.

Таким образом, повышение коэффициента равномерности поступления коксового орешка из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи на 0,1 в интервале от -1,2 до 0,74 сопровождалось повышением степени восстановления Fe из FeO газом CO на 0,16% абс., снижением степени восстановления Fe из FeO углеродом на 0,17 % абс., уменьшением соотношения теплоёмкостей потоков шихты и газа в верхней части печи (с температурами менее 850 °С) на 0,0013 и, как результат, повышением коэффициента замены кокса орешком на 0,016 кг/кг при понижении удельного расхода кокса на 0,30 кг/т чугуна [464-467].

### **3.2.3 Уменьшение окружной неравномерности распределения отношения расходов природного газа и дутья по фурмам горна печи**

Наряду с использованием рациональных режимов загрузки компонентов железорудной части шихты в колошниковое пространство для обеспечения ровности хода печи и, следовательно, повышения технико-экономических показателей ее работы целесообразно стремиться обеспечивать равномерный состав фурменных газов по окружности горна. В настоящее время в условиях работы доменных печей ПАО «ММК» обеспечивается неравномерное распределение дутья по окружности печи при одинаковом расходе природного газа на каждую из фурм. Это сопровождается различием в объеме газа по фурмам, неоднородностью состава газовой фазы по окружности печи, теоретической температуры горения в фурменных очагах, что приводит к неравномерному протеканию процессов восстановления и плавления по окружности и высоте печи, несмотря на применение рациональных режимов загрузки железорудных материалов в колошниковое пространство печи. Одним из направлений устранения искажения хода процессов, протекающих в доменной печи по окружности и, следовательно, улучшение технико-

экономических показателей ее работы в целом является выравнивание теоретической температуры горения по окружности горна. Это можно обеспечить стабилизацией отношений расходов природного газа и дутья по фурмам, путем регулирования расхода газа по фактическому количеству дутья, поступающему через соответствующую фурму.

В настоящее время в условиях ПАО «ММК» отношение расхода природного газа по отношению к дутью по фурмам колеблется от 5 до 11%. Такое колебание расходов источников окислительного и восстановительных газов по фурмам печи обеспечивает величину коэффициента неравномерности расходов природного газа и дутья  $p_{\text{пг/д}}$ , вычисленной по разработанной методике (см. подраздел 3.1), равной 0,3. Для определения коэффициента неравномерности  $p_{\text{пг/д}}$ , так же как и для оценки неравномерности распределения измерения температур по окружности печи, необходимо преобразование получаемой доли расхода природного газа по отношению к дутью на каждой из фурм так, чтобы приведенное отношение, формирующее  $\chi^2$ -статистику, отражало поведение квантилей  $\chi_{k,p}^2 < \chi_k^2(\alpha)$  распределения Пирсона для  $k=N-1$  в условиях выполнения  $H_0$ -гипотезы. Для этого рассчитывали долю расхода природного газа по отношению к расходу дутья в процентах на каждую из фурм. Отсортировывали все значения от минимального к максимальному, после чего определили среднее значение полученных величин по 5 группам в порядке возрастания. Таким образом, для условий доменных печей, имеющих в своем составе 20 фурм, находили среднеарифметическое значение между 4 переменными, для условий печей, работающих на 25 фурмах, задействовали по 5 значений. Затем выявили подходящий коэффициент, равный  $7=q$ , позволяющий преобразовать натуральное значение отношений расходов природного газа и дутья в процентах, к аналогичной частоте, а именно  $n_i = 7 \cdot (\text{ПГ/Д}) \cdot 100$ . Такое преобразование дало возможность получить адекватную сходимость по вероятности  $p(X_{\text{кор}}^2) \rightarrow p(\chi_k^2)$  с учетом используемых степеней свободы  $k=N-1$  (проверено для  $N = 5$ ).

На доменных печах № 2, 4 и 10 ПАО «ММК» объемом 1370 и 2014 м<sup>3</sup> исследовали взаимосвязь показателей хода процессов, в том числе изменение

коэффициента окружной неравномерности распределения газового потока в шахте печи, определяемой по температурам периферийного газа, от изменения коэффициента неравномерности распределения отношений расходов природного газа и дутья по фурмам при постоянном расходе газа, увеличении его количества, вдуваемого в единицу времени [468-473]. При этом обеспечивали уменьшение неравномерности распределения отношений расходов газа и дутья по фурмам, как по окружности горна, так и в отдельных его секторах. Результаты приведены в табл. 3.24-3.31.

На доменной печи № 10 ПАО «ММК» исследовали по два парных периода. Показатели работы печей усреднили в два периода – базовый (I) и опытный (II). В базовом коэффициент неравномерности распределения отношений расходов природного газа и дутья фурмам составил 0,34. Колебания данного отношения по фурмам приведено на рисунке 3.1 ( $A_1$  и  $A_2$ ). Увеличением расхода природного газа на фурмах № 1, 8-13, 17 и уменьшением его расхода на фурмах № 20-24 в периоде II при сохранении общего расхода природного газа, равном  $21,8 \text{ м}^3/\text{ч}$  обеспечили понижение коэффициента неравномерности  $p_{\text{пр/д}}$  с 0,34 до 0,03.

Уменьшение коэффициента неравномерности распределения отношений расходов природного газа и дутья по фурмам  $p_{\text{пр/д}}$  в периоде II по сравнению с периодом I с 0,34 до 0,03 сопровождалось снижением коэффициента окружной неравномерности распределения температур  $p_t$  газа на периферии на 0,03 (таблица 3.24). Уменьшение колебания соотношения расходов газа и дутья по фурмам в условиях сохранения расхода природного газа в количестве  $21,8 \text{ м}^3/\text{час}$  сопровождалось повышением эффективности использования водорода, на что указывает увеличение степени восстановления Fe из FeO водородом на 0,8% абс, степенью использования водорода на 1,6 % абс. при увеличении соотношения степеней использования  $\text{H}_2$  и CO с 0,94 до 0,98 (таблица 3.27). В условиях понижения интенсивности теплообмена в зоне с температурами более  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  и менее  $850 \text{ }^\circ\text{C}$ , на что указывает уменьшение соотношения теплоёмкостей потоков шихты и газа в нижней части печи (с температурами более  $850 \text{ }^\circ\text{C}$ ) с 1,885 до 1,856 и увеличение в верхней с 0,858 до 0,871 (таблица 3.25), свидетельствует о

повышении тепловой и химической степени использования газового потока в зоне умеренных температур.

Таблица 3.24 – Параметры дутья и колошниковога газа в исследуемые периоды

Наименование показателей	Периоды									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
	Коэффициент неравномерности распределения отношений расходов природного газа и дутья по фурмам $p_{пг/д}$									
	0,34	0,03	0,04	0,24	0,0	0,15	0,0	0,13	0,24	0,0
Доменная печь	10		4			10				
Расход:										
дутья, м <sup>3</sup> /мин	3682	3763	2823	2840	2820	3664	3673	3626	3627	3675
ПГ, тыс. м <sup>3</sup> /ч	21,8	21,8	15,5	16,0	16,0	22,0	22,4	20,95	21,4	21,5
Давление горячего дутья, кПа	278	274	257	258	258	275	274	273	272	274
Температура дутья, °С	1123	1124	1189	1180	1185	1126	1122	1117	1125	1125
Содержание кислорода, %	27,5	27,1	26,9	27,6	26,9	27,7	27,7	27,9	27,8	27,9
Отношение расхода природного к дутью, %:										
среднее	8,16	8,44	5,5	5,7	5,6	8,39	8,71	8,68	8,50	8,42
максимальное	9,23	8,99	6,4	7,0	5,9	9,54	8,84	9,92	9,13	8,94
минимальное	6,91	7,96	5,1	4,6	5,3	4,58	8,56	7,94	7,73	7,50
Интервал от среднего,										
максимальный	1,07	0,55	0,9	1,2	0,3	1,15	0,13	1,24	0,77	0,92
минимальный	1,24	0,48	0,5	1,2	0,3	3,81	0,15	0,75	0,63	0,52
Коэффициент окружной неравномерности распределения периферийных температур $p_t$	0,55	0,52	0,69	0,70	0,63	0,91	0,90	0,98	0,96	0,94
Градиент температур по периферии, °С	270	217	240	247	202	423	337	446	422	403
Температура в газоотводах, °С	153	144	135	150	127	159	150	158	158	162
Давление колошниковога газа, кПа	129	130	138	138	139	130	130	129	129	130

Таблица 3.25 – Показатели тепловой работы печи по периодам

Наименование показателей	Периоды									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
	Коэффициент неравномерности распределения отношений расходов природного газа и дутья по фурмам $p_{\text{пг/д}}$									
	0,34	0,03	0,04	0,24	0,0	0,15	0,0	0,13	0,24	0,0
Соотношение теплоёмкостей потоков шихты и газа: в нижней части печи (с $t > 850$ °С)	1,885	1,856	1,861	1,907	1,867	1,886	1,854	1,903	1,850	1,885
в верхней части печи (с $t < 850$ °С)	0,858	0,871	0,886	0,865	0,894	0,851	0,847	0,852	0,849	0,845
Суммарный расход тепла на проведение всех процессов в определяющей зоне, МДж/т чугуна	1899	1994	2222	2021	2190	1907	1872	1758	1838	1774
Потери тепла в определяющей зоне, %	31,7	26,3	23,6	30,1	24,5	29,5	32,5	40,2	32,1	36,4

В результате организация перераспределения природного газа по фурмам обеспечила снижение удельного расхода кокса с 418,7 до 417,4 кг/т чугуна. Уменьшение коэффициента неравномерности соотношений расходов природного газа и дутья по фурмам с 0,41 до 0,12 на доменной печи № 2 ПАО «ММК», работающей с верхней определяющей зоной по силовому взаимодействию потоков шихты и газа, при сохранении расхода природного газа на уровне 13,4 м<sup>3</sup>/ч сопровождалось повышением степени использования водорода на 3,4% отн., снижением окружной неравномерности распределения

газа на периферии  $p_t$  с 0,34 до 0,28 и, как следствие, уменьшением удельного расхода кокса на 1,5 кг/т чугуна.

Увеличение расхода природного газа с 15,5 до 16,0 м<sup>3</sup>/ч в периоде IV по сравнению с периодом III в условиях повышенной газодинамической напряженности в нижней части доменной печи № 4 ПАО «ММК» сопровождалось ростом коэффициента сопротивления шихты движению газа в нижней части печи, самопроизвольным перераспределением дутья по фурмам. В результате  $p_{пг/д}$  увеличился с 0,04 до 0,24. Интервалы между максимальной и средней, а также средней и минимальной величинами соотношения расходов газа и дутья повысились соответственно с 0,5 и 0,9 до 1,2 (рисунок 3.1, В<sub>1</sub>-В<sub>2</sub>). Это отрицательно сказалось на распределении газов по окружности печи. Коэффициент окружной неравномерности распределения периферийных температур увеличился с 0,69 до 0,70. Градиент температур по периферии вырос с 240 до 247 °С. Степень использования водорода уменьшилась с 37,9 до 37,3%. Неэффективное использование природного газа привело к перерасходу кокса. Удельная его величина выросла с 449,4 до 449,6 кг/т чугуна.

Таблица 3.26 – Показатели интенсивности и сопротивления шихты

Наименование показателей	Периоды									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
	Коэффициент неравномерности распределения отношений расходов природного газа и дутья по фурмам $p_{пг/д}$									
	0,34	0,03	0,04	0,24	0,0	0,15	0,0	0,13	0,24	0,0
Коэффициент сопротивления шихты движению газов:										
– на колошнике	0,26	0,31	0,42	0,38	0,60	0,35	0,28	0,08	0,06	0,07
– в горне	10,0	9,3	11,8	11,8	11,7	10,88	10,87	10,3	10,3	10,2
Динамический напор газа на колошнике, Н/м <sup>2</sup>	2,7	2,7	1,55	2,6	2,3	1,95	2,14	2,2	2,2	2,3

Для эффективного использования природного газа в количестве 16 тыс. м<sup>3</sup>/ч в периоде V по сравнению с периодом IV уменьшили колебания соотношений расходов природного газа и дутья по фурмам с учетом температуры периферийных газов. В результате интервалы между максимальной и средней, а также средней и минимальной величинами соотношений расхода газа и дутья уменьшились с 1,2 до 0,3 (рисунок 3.1, В<sub>3</sub>). Причем отклонение соблюдали таким образом, чтобы расход природного газа был выше в местах с пониженной температурой периферийных газов и наоборот (таблица 3.28). На южной стороне печи температура периферийных газов была несколько выше, поэтому в эту область давали больше природного газа. В результате добились уменьшения коэффициента неравномерности распределения соотношений расходов природного газа к дутью с 0,24 до 0,0.

Таблица 3.27 – Показатели хода восстановления Fe из FeO

Наименование показателей	Периоды									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
	Коэффициент неравномерности распределения отношений расходов природного газа и дутья по фурмам $r_{\text{пг/д}}$									
	0,34	0,03	0,04	0,24	0,0	0,15	0,0	0,13	0,24	0,0
Степень восстановления Fe из FeO различными восстановителями, %: углеродом монооксидом углерода водородом	23,2	27,4	34,6	33,6	32,9	24,0	22,0	18,0	21,9	19,5
	53,2	48,1	43,0	44,4	43,4	52,2	49,4	56,2	51,8	55,0
	23,7	24,5	22,4	22,0	23,7	23,8	28,6	25,8	26,3	25,5
Степень использования газа-восстановителя, %: CO H <sub>2</sub>	44,9	44,8	46,1	46,3	46,5	44,2	43,9	43,7	45,1	44,7
	42,3	43,9	37,9	37,3	39,8	43,7	50,1	45,7	47,2	46,4
Соотношение степеней использования H <sub>2</sub> и CO	0,94	0,98	0,82	0,81	0,86	0,99	1,14	1,05	1,05	1,04

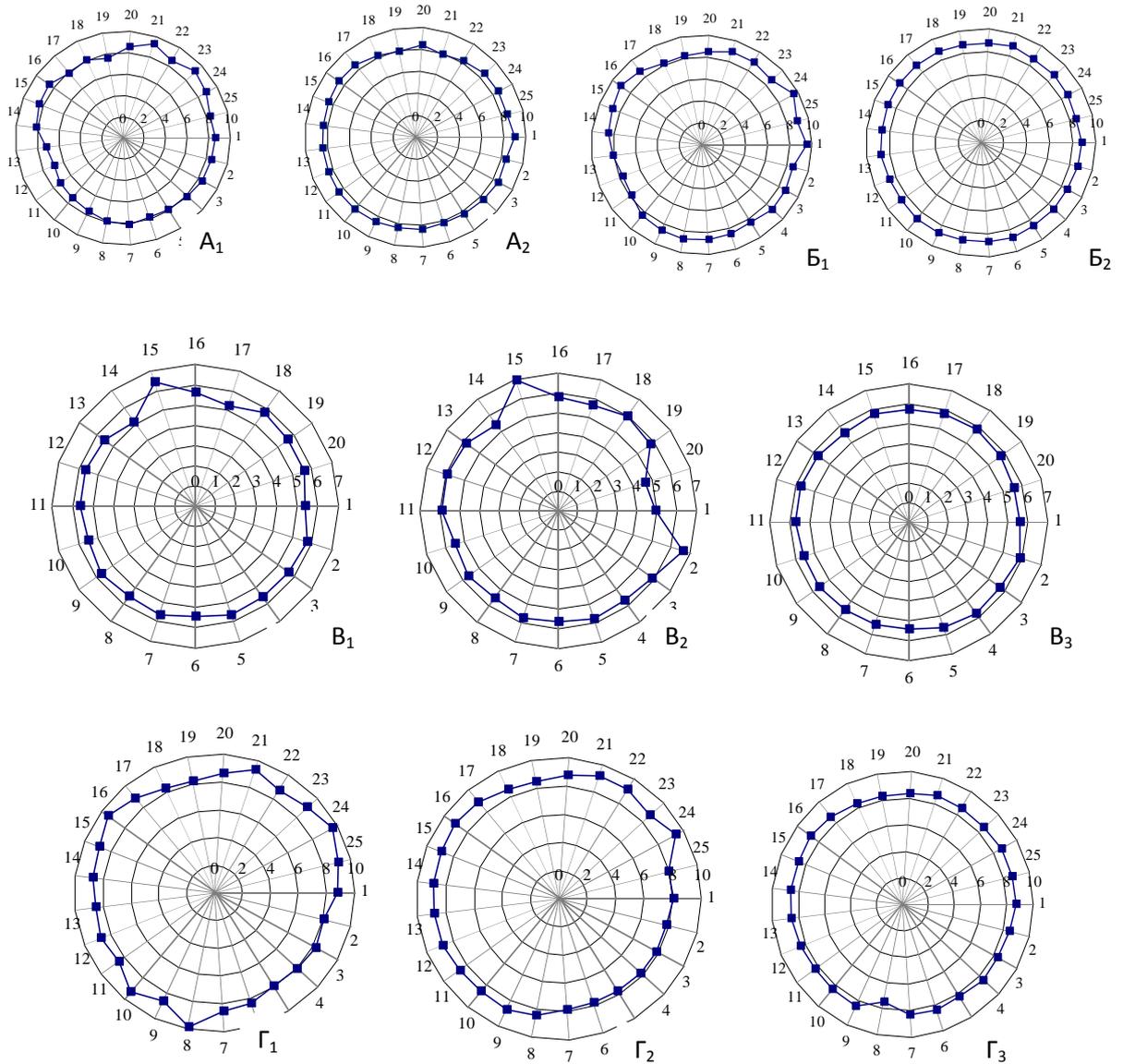


Рисунок 3.1 – Распределение отношений расходов природного газа и дутья по фурмам доменных печей № 10 и 4 в периодах I (A<sub>1</sub>), II (A<sub>2</sub>), VI (B<sub>1</sub>), VII (B<sub>2</sub>), III (B<sub>1</sub>), IV (B<sub>2</sub>), V (B<sub>3</sub>), VIII (Г<sub>1</sub>), IX (Г<sub>2</sub>), X (Г<sub>3</sub>)

Стабилизация соотношения расходов газа и дутья по фурмам с учетом температуры периферийных газов в периоде V по сравнению с периодом IV сопровождалась снижением газодинамической напряженности в нижней части печи, на что указывает уменьшение коэффициента сопротивления шихты в этой зоне на 0,85%. Уменьшение взаимного сопротивления шихты и газа, смещение процессов восстановления и теплообмена в зону умеренных температур сопровождалось эффективным использованием природного газа. Степень восстановления Fe из FeO водородом увеличилось на 1,7% абс. при росте степени

использования  $H_2$  на 2,5% абс. В результате управляющим воздействием на расход газа по фурмам обеспечили уменьшение удельного расхода кокса с 449,4 до 447,4 кг/т чугуна в периоде V по сравнению с периодом IV.

На доменной печи № 10 ПАО «ММК» обеспечили одновременное увеличение расхода природного газа от 22,0 м<sup>3</sup>/ч в базовом периоде (период VI) до 22,4 м<sup>3</sup>/ч в опытном (VII) и перераспределение его по фурмам таким образом, чтобы интервалы между максимальной и средней, а также средней и минимальной величинами соотношения расходов природного газа и дутья уменьшились соответственно с 1,15 и 3,81 до 0,13 и 0,15. При этом коэффициент неравномерности распределения соотношений расходов природного газа и дутья по фурмам уменьшился с 0,15 до 0,0. Так же как и в предыдущих периодах, наблюдали уменьшение окружной неравномерности распределения периферийных температур, улучшение использования химической энергии газового потока и, как следствие, снижение удельного расхода кокса, исходя из коэффициента замены его газом, равным 0,86 кг/м<sup>3</sup>.

На доменной печи № 10 в периоде IX компенсировали отрицательное действие дополнительного расхода природного газа на отдельные стороны доменного процесса путем повышения равномерности соотношения расходов природного газа и дутья по фурмам в отдельных секторах горна печи, ввиду сильного различия в градиенте температур в периоде VIII по периферии в шахте, равном 446 °С, и, как следствие, высокой величины коэффициента окружной неравномерности распределения периферийных температур, равной 0,98. В среднем в верхней части печи по окружности можно выделить две зоны, отличающиеся температурным режимом. Первая находилась над фурмами № 1-7, 25 (рисунок 3.2). Оставшаяся часть печи по окружности составляла вторую зону. Средняя температура газа на периферии, замеряемая термопарами № 1, 2, составляла 743°С (см. таблицу 3.30). Температура периферийного газа под газоотводами была равной 229°С. Температуры, замеряемые аналогичными термопарами, в зоне над фурмами № 8-24 составляли соответственно 449 и 145°С.

Таблица 3.28 – Усредненная температура периферийных газов на доменной печи № 4 в периоде III по сторонам света

Наименование показателей	Расположение воздушных фурм и периферийных термопар по сторонам света	
	юг	север
Усредненная температура периферийных газов, °С	318	202
Усредненное отношение расходов газа и дутья по фурмам	5,56	5,62

Таблица 3.29 – Техничко-экономические показатели работы печи

Наименование показателей	Периоды									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
	Коэффициент неравномерности распределения отношений расходов природного газа и дутья по фурмам, $R_{пг/д}$									
	0,34	0,03	0,04	0,24	0,0	0,15	0,0	0,13	0,24	0,0
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна: фактический приведенный к условиям базового периода	418,7 -	418,5 417,4	449,4 -	452,2 449,6	447,9 447,4	413,3 -	414,5 411,5	431,4 -	414,4 426,3	419,0 428,0
Производительность, т/сут: по фактическому количеству загруженных подач приведенная к условиям базового периода	5075 -	5154 5144	3640 -	3725 3695	3641 3659	5010 -	5001 5053	4710 -	4919 4783	4960 4904
Расход сырьевых материалов, кг/т чугуна	1639	1620	1634	1648	1621	1715	1713	1709	1692	1702
Содержание Fe в шихте, %	56,6	56,5	57,5	56,9	57,2	57,0	57,0	56,8	57,4	57,1

Таблица 3.30 – Температура газа на периферии в периоды VIII на доменной печи № 10

Наименование показателей	Периоды		
	VIII	IX	X
	Расход природного газа, тыс. м <sup>3</sup> /ч		
	20,95	21,40	21,50
Температура газа на периферии, °С:			
на термопарах № 1, 2	743	666	621
то же № 3-6	449	386	383
Δ между № 1, 2 и 3-6	294	280	238
Температура газа на периферии под газоотводами, °С:			
на термопарах № 1-3, 8	229	205	207
то же № 4-7	145	142	151
Δ между № 1-3, 8 и 4-7	84	63	56

Визуальным наблюдением за фурменными очагами установили, что фурмы № 1-7, 25 работали «темно», что свидетельствует об избыточном количестве природного газа, подаваемого на них. В области, где располагаются фурмы № 8-24, за исключением фурм № 9, 15, 17, 21, 23, 24, в очагах горения наблюдали яркое свечение, что свидетельствует о резерве по дополнительному расходу газа на них. В оставшихся фурмах из визуального наблюдения следовало, что отношение расходов природного газа и дутья было приемлемым. Очаги горения работали «ярко». Фурмы «не зарастали».

В связи с этим в периоде IX при увеличении расхода природного газа от 20,95 до 21,40 тыс. м<sup>3</sup>/ч отношение расходов газа и дутья на фурмах № 1-7, 25 уменьшили в среднем с 8,38 до 7,83, на оставшихся фурмах снизили в среднем с 8,90 до 8,81 (таблица 3.31). Таким образом, разность соотношений между двумя зонами увеличилась с 0,52 до 0,98 (рисунок 3.1, Г<sub>1</sub>, Г<sub>2</sub>). Достигали это путем уменьшения расхода природного газа на фурмы № 1-7, 25 суммарно на 194 м<sup>3</sup>/ч и увеличением на оставшихся фурмах суммарно на 738 м<sup>3</sup>/ч, в том числе 318 м<sup>3</sup>/ч на фурму № 8, которая ближе всех находится к месту подвода горячего дутья к кольцевому воздухопроводу. Коэффициенты неравномерности соотношений расходов газа и дутья по фурмам для каждой из зон составляли 0, при этом средняя величина по всем фурмам была равной 0,24.

Таблица 3.31 – Параметры дутья в периоды VIII-X

Наименование показателей	Периоды		
	VIII	IX	X
Расход природного газа в среднем на одну фурму, м <sup>3</sup> /ч: на фурмах № 1-7, 25	707	683	760
	№ 8-24	727	770
Отношение расхода природного к дутью: на фурмах № 1-7, 25	8,38	7,83	8,41
	№ 8-24	8,90	8,81

Изменение расхода природного газа на фурмы доменной печи № 10 при общем увеличении расхода газа на 450 м<sup>3</sup>/ч в периоде IX по сравнению с периодом VIII сопровождалось повышением степени использования водорода от 45,7 до 47,2 % и СО от 43,7 до 45,1%. Коэффициент окружной неравномерности распределения периферийных температур уменьшился с 0,98 до 0,96. Градиент температур по периферии под газоотводами снизился от 121 до 104 °С, на периферии в шахте с 446 до 422 °С. Повышение степени использования тепловой и химической энергии газового потока обеспечило снижение удельного расхода кокса, приведенного к условиям базового периода на 5,1 кг/т чугуна (таблица 3.29).

После работы печи в периоде IX длительностью 7 сут в периоде X повысили равномерность отношения расходов дутья и природного газа по всем фурмам (рисунок 3.1, Г<sub>3</sub>). Обеспечили это увеличением расхода природного газа на фурмы № 1-7, 25 суммарно на 618 м<sup>3</sup>/ч. На фурме № 8 снизили расход газа на 196 м<sup>3</sup>/ч при незначительном изменении его расхода на оставшиеся фурмы (см. таблицу 3.31). В результате степень использования водорода и СО снизились соответственно на 0,8 и 0,37% абс. при повышении удельного расхода кокса на 1,7 кг/т чугуна. Ухудшение показателей работы печи связано с преждевременным выравниванием расходов природного газа и дутья по фурмам. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности изменения соотношения расходов природного газа и дутья по фурмам в отдельных секторах горна печи, в условиях сильного различия процессов, протекающих по ее окружности.

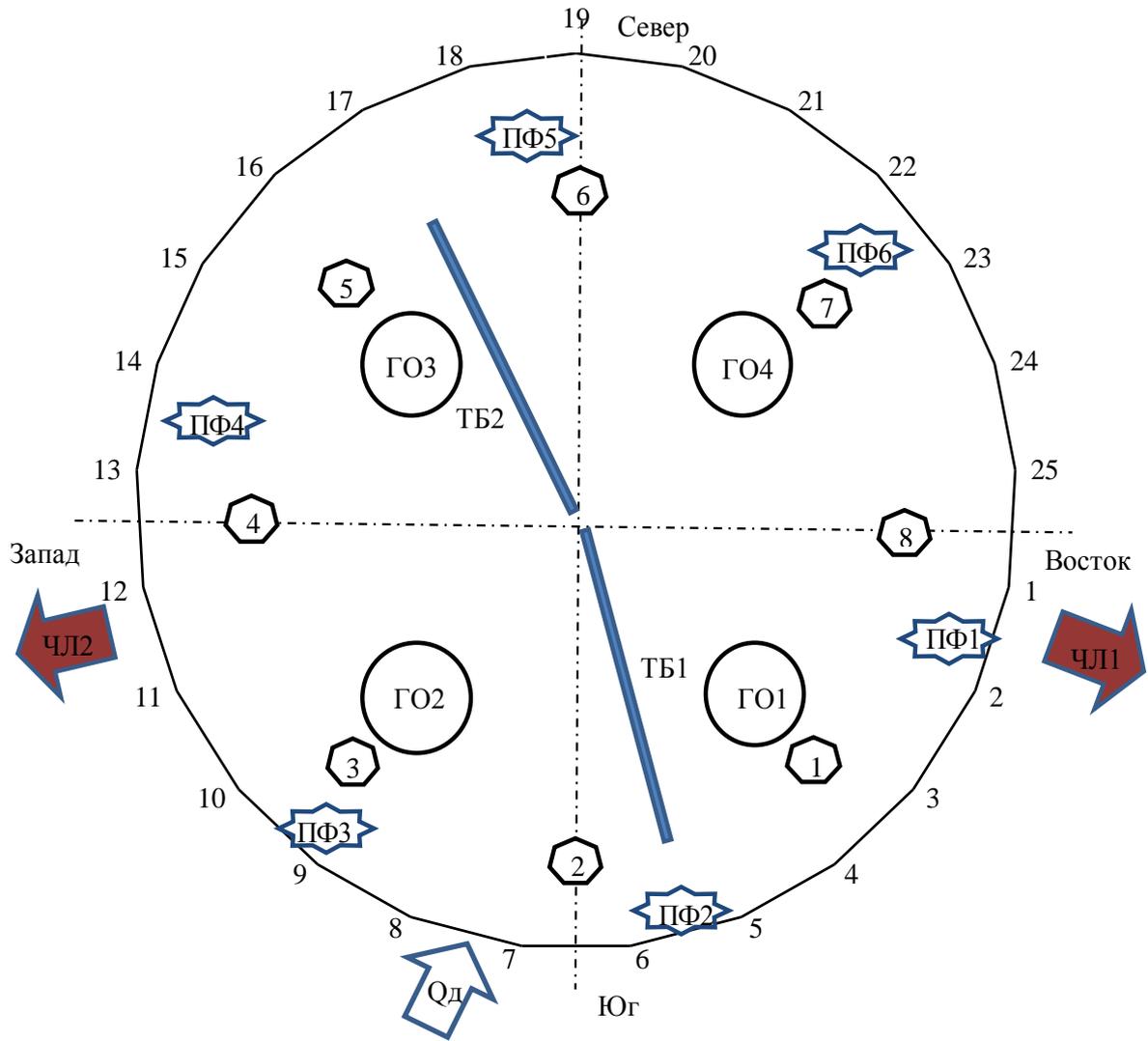


Рисунок 3.2 – Схема расположения фурм и термопар по окружности доменной

печи № 10: 1 – фурма № 1;

ТБ1 – балка замера температуры и газа по радиусу;

① – термопара № 1 периферийного газа под газоотводом;

☆1 – термопара № 1 периферийного газа;

→ ЧЛ1 – ось чугунной летки № 1;

→ Q<sub>д</sub> – подвод дутья;

○ ГО1 – газоотвод № 1.

Таким образом, при работе печи с ярко выраженными температурными зонами по окружности в верхней ее части эффективнее было перераспределять природный газ по фурмам таким образом, чтобы обеспечить максимально возможную разность отношений расходов газа и дутья между двумя зонами. При этом в секторе с повышенными температурами расход газа необходимо было уменьшать и, наоборот, в область с пониженными температурами – увеличивать.

### Выводы по главе 3

1. Разработана и предложена методика определения относительной неравномерности распределения материалов и газов по окружности печи на основе  $X^2$ -статистики, используя квантили  $\chi_k^2$  - статистики для вычисления  $p = p(\chi_k^2)$ . Установлено, что для использования  $X^2$ -статистики измерений температуры газа по окружности печи необходимо корректировать, минимизируя значения  $X^2$  до верхней  $\alpha$  -квантили  $\chi_k^2(\alpha)$  на заданном уровне значимости  $\alpha = 1 - p$  при  $k=N-1$  степенях свободы. Предлагается ввести понятие квантильного множителя  $q$  для корректировки  $X^2$ , с помощью которого произведение  $q \cdot X_{\max}^2 \approx \chi_k^2(\alpha)$ , где  $\chi_k^2(\alpha)$  – верхняя  $\alpha$  -квантиль, устанавливаемая для отклонения  $H_0$ -гипотезы на уровне значимости  $\alpha$  при условии, если  $q \cdot X^2 = X_{\text{кор}}^2 \geq \chi_k^2(\alpha)$ . Тогда  $q \cdot X^2 = X_{k,p}^2 \Rightarrow p = p(\chi_{k,p}^2)$ , где  $\chi_{k,p}^2$  – внутренняя квантиль для определения показателя  $p$  (относительная неравномерность  $p < 1 - \alpha$ ).

2. Методика определения окружной неравномерности распределения материалов и газов апробирована на доменных печах ПАО «ММК» объемом 1370 и 2014 м<sup>3</sup>. Установлено, что воздействовать на коэффициент окружной неравномерности распределения температур  $p_t$  возможно изменением последовательности набора компонентов шихты в бункер БЗУ.

3. Разработан и внедрен в ПАО «ММК» рациональный режим набора компонентов сырья в шихтовый бункер БЗУ, обеспечивший повышение равномерности поступления их в колошниковое пространство печи. Переход с режима загрузки «добавки наверх скипа» на «добавки на дно скипа» сопровождался понижением коэффициента окружной неравномерности распределения температур на 40,3% в результате повышения показателя равномерности  $K_{ЖРС}$  поступления компонентов шихты из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи с 0,30 до 0,62. Переход на режим загрузки, предполагающий размещение добавочных материалов, в том числе окатышей, в слое агломерата сопровождался повышением  $K_{ЖРС}$  до 0,71, что обеспечивало уменьшение  $p_t$  по сравнению с режимом загрузки «добавки наверх скипа» на 55,8%.

4. Понижение коэффициента окружной неравномерности распределения температур на 10% в интервале от 0,34 до 0,77 в результате повышения поступления компонентов шихты из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи обеспечивало увеличение производительности доменных печей № 2, 4, 6, 9 ПАО «ММК» на 0,22% и понижение удельного расхода кокса на 0,41%.

5. По результатам исследований на доменных печах № 4, 6 и 9 ПАО «ММК» установили, что понижение коэффициента неравномерности распределения температур по окружности печи на 41% путем перехода с режимов загрузки добавки на дно или наверх бункера БЗУ на разработанный рациональный режим загрузки, обеспечивающий размещение добавочных материалов, в том числе окатышей, в слое агломерата, сопровождался ростом коэффициента сопротивления шихты движению газового потока в верхней части печи на 5,1%. Это приводило к уменьшению скорости газа в низкотемпературной зоне на 3,1%, снижению динамического напора газа на 4,44%, что сопровождалось смещением интенсивности протекания процессов восстановления и теплообмена в зону умеренных температур. Уменьшилась степень восстановления Fe из FeO углеродом на 2,3% отн. при повышении

водородом и монооксидом углерода соответственно на 1,7 и 1,3% отн. Увеличивалось соотношение теплоёмкостей потоков шихты и газа в верхней части печи на 1,25% отн.

6. По результатам исследований на доменных печах № 2, 4 ПАО «ММК» установили, что повышение показателя равномерности поступления коксового орешка из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи на 0,1 в интервале от -1,2 до 0,74 сопровождалось повышением степени восстановления Fe из FeO газом CO на 0,16% абс., снижением степени восстановления Fe из FeO углеродом на 0,17 % абс., уменьшением соотношения теплоёмкостей потоков шихты и газа в верхней части печи (с температурами менее 850 °С) на 0,0013.

7. Повышение показателя равномерности поступления коксового орешка из бункера БЗУ в колошниковое пространство доменной печи № 4 от -1,2 до 0,74 сопровождалось улучшением фильтрующей способности коксовой насадки в горне печи. Количество остающегося в печи шлака сократилось с 18,1 до 16,0 т, его вязкость снизилась с 0,56 до 0,52 Па·с. Улучшение проницаемости коксовой насадки в горне для продуктов плавки путём повышения равномерности поступления коксового орешка из бункера в колошниковое пространство печи обеспечило увеличение коэффициента замены им кокса с 0,68 до 0,88 кг/кг. Повышением окружной равномерности распределения коксового орешка при использовании двухскиповой загрузки шихтовых материалов в бункер БЗУ доменной печи № 2 обеспечили повышение коэффициента замены кокса орешком с 0,68 до 0,91 кг/кг.

8. Разработана и внедрена в ПАО «ММК» технология доменной плавки, позволяющая повысить технико-экономические показатели работы печи путем уменьшения неравномерности распределения отношений расходов природного газа и дутья по фурмам  $p_{\text{пг/д}}$ . Понижение величины  $p_{\text{пг/д}}$  от 0,34 до 0,03 на доменной печи № 10 ПАО «ММК» в условиях постоянного расхода газа, равного 21,8 тыс. м<sup>3</sup>/ч, обеспечило рост степени использования водорода на 3,8 % отн. и уменьшение удельного расхода кокса на 0,3 %. Уменьшение коэффициента окружной неравномерности  $p_{\text{пг/д}}$  от 0,24 до 0,0 на доменной печи

№ 4 компенсировало отрицательное действие на ход плавки дополнительного расхода газа в количестве  $500 \text{ м}^3/\text{ч}$ , коэффициент замены кокса газообразным топливом составил  $0,89 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; снижение  $p_{\text{пг/д}}$  с  $0,15$  до  $0,0$  на доменной печи № 10 позволило увеличить расход природного газа на  $400 \text{ м}^3/\text{ч}$  с коэффициентом замены  $0,86 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

9. При работе печи с ярко выраженными температурными зонами по окружности в верхней ее части, отличающимися более чем в  $250^\circ\text{C}$ , целесообразно было перераспределять природный газ по фурмам таким образом, чтобы обеспечить максимально возможную разность отношений расходов газа и дутья между двумя зонами. Установление отношений расходов природного газа и дутья, равных  $7,83$  и  $8,81$  на фурмы, располагающиеся соответственно в зонах с температурами периферийного газа  $743$  и  $449^\circ\text{C}$ , при увеличении расхода природного газа на  $450 \text{ м}^3/\text{ч}$  обеспечило экономию удельного расхода кокса на  $1,7 \text{ кг}/\text{т}$  чугуна. При этом отношение удельных расходов кокса и природного газа уменьшилось от  $4,41$  до  $4,29$ . Дальнейшее выравнивание отношений расходов природного газа и дутья до  $8,42$  на всех фурмах сопровождалось ростом отношения удельных расходов кокса и природного газа до  $4,38$ .

## **Глава 4 ВЫЯВЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЗАГРУЗКИ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПЕЧИ**

Использование неофлюсованных окатышей в шихте доменных печей ПАО «ММК» обусловлено недостаточной производительностью агломерационных машин. В среднем их доля в железорудной части шихты находится в интервале от 30 до 35%. В периоды ремонта аглофабрик доля окатышей достигает 50% и выше. В виду ускоренного износа футеровки печи и преждевременного выхода холодильников шахты, заплечиков и распара при повышенной доле окатышей в составе шихты исследовали стойкость системы охлаждения в условиях изменения параметров загрузки – матрицы, доля неофлюсованных окатышей от расхода железорудной части шихты, размер колоши и уровень засыпи материалов. Оценили параметры режима загрузки и показатели работы печи при выходе холодильников из рабочего состояния. Выявили предельную долю окатышей в составе железорудной части шихты, при которой не требуется использование мероприятий, компенсирующих отрицательное воздействие их расхода на стойкость футеровки. Разработали рациональные режимы загрузки, обеспечивающие устранение искажения рабочего профиля печи при различных условиях ее работы – шихтовые материалы, наличие настывы или угроза истирания шахты распара и заплечиков печи [474-478].

### **4.1 Стойкость системы охлаждения в условиях изменения параметров режима загрузки**

#### **4.1.1 Матрицы загрузки**

На доменных печах № 4, 9 и 10 ПАО «ММК», оснащенных компактным бесконусным загрузочным устройством лоткового типа, изучили влияние вида матрицы загрузки на изменение тепловых нагрузок системы охлаждения шахты. Среднее содержание окатышей в исследуемые периоды составляла 33%.

На доменных печах № 9 и 10 рассмотрели по два периода с максимальными и минимальными температурами холодильников шахты.

На доменной печи № 9 период I охватывал 219 сут работы печи. Температуры холодильников изменялись в пределах от 21 до 35<sup>0</sup>С. Средняя температура составляла 28<sup>0</sup>С. Период II включал 195 суток работы печи. Параметры работы печи обеспечивали средние температуры холодильников шахты в интервале 50-95<sup>0</sup>С. Средняя температура была равна 61<sup>0</sup>С.

В периоде II по сравнению с периодом I наблюдали увеличение рудной нагрузки на периферии при понижении ее в зоне рудного гребня. Это обеспечили увеличением содержания рудной части шихты от 29,2 до 35,1%, поступающих на колошник со станций № 9-11 при понижении содержания кокса от 5,1 до 0%. На станциях № 6-8 углового положения лотка снижали рудную составляющую от 41,8 до 31,7% и увеличивали содержание кокса от 48,2 до 51,7%.

Содержание материалов, поступающих в колошниковое пространство печи со станций углового положения лотка по всем видам матриц, было следующим, %:

		Кокс										
Номер станции		11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Период I		0,0	0,4	4,7	13,5	15,8	18,9	18,0	17,3	6,7	4,6	0,0
Период II		0,0	0,0	0,0	12,9	16,2	22,6	19,3	19,3	6,5	3,2	0,0
		Железорудные материалы										
Номер станции		11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Период I		0,2	12,2	16,8	12,9	14,9	14,1	13,4	10,7	4,9	0,0	0,0
Период II		0,0	17,6	17,4	9,5	10,9	11,4	12,1	12,8	8,2	0,0	0,0

Повышение рудной нагрузки в периферийной зоне печи в периоде II по сравнению с периодом I сопровождалось повышением содержания газа CO<sub>2</sub> в этой зоне от 17 до 19%. При этом температуры радиального газа на периферии повысились от 116 до 121<sup>0</sup>С, периферийного газа в шахте увеличились от 269 до 359<sup>0</sup>С. Повышение температур в газоотводах печи составило 45<sup>0</sup>С от 119 до 144<sup>0</sup>С. Увеличился градиент температур газа по периферии от 122 до 183<sup>0</sup>С.

Производительность печи в периоде с низкими температурами составляла 4051 т чугуна в сутки. В периоде с высокими температурами холодильников она снизилась до 3606 т чугуна в сутки. Это является результатом снижения расхода дутья от 3664 до 3606 м<sup>3</sup>/мин и уменьшения содержания в нем кислорода от 27,3 до 26,3%. Расход кокса в периоде с повышенными температурами холодильников шахты составил 471,0 кг/т чугуна, что на 8,3 кг/т чугуна больше, чем в периоде с пониженными температурами холодильников. Одной из причин было снижение расхода природного газа от 21 до 18 тыс. м<sup>3</sup>/час.

Повышенный расход кокса в периоде с интервалами температур холодильников шахты от 50 до 95 °С обеспечил содержание кремния в чугуне, равное 0,88%, против 0,70% в периоде с интервалами температур от 21 до 35%.

Содержание материалов, поступающих на поверхность засыпи со станций углового положения лотка доменной печи № 10 по всем видам матриц, было следующим, %:

Номер станции	Кокс										
	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Период III	0,0	1,9	4,6	14,0	15,7	16,6	16,0	14,3	12,5	4,2	0,0
Период IV	0,0	0,0	0,0	14,3	17,2	17,1	17,1	14,3	17,1	2,9	0,0
Номер станции	Железорудные материалы										
	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Период III	0,4	12,9	16,0	13,1	13,3	12,7	15,3	12,8	3,4	0,0	0,0
Период IV	0,1	18,2	16,1	9,6	10,4	8,6	15,7	15,7	5,6	0,0	0,0

В двух периодах на печи № 10 с температурами холодильников 45<sup>0</sup>С (358 сут) и 68<sup>0</sup>С (275 сут) содержание рудной составляющей, поступающей со станций № 9-11, увеличилась от 29,3 до 34,4 %, содержание кокса уменьшилось от 6,6 до 0%. Это сопровождалось повышением средней температуры холодильников шахты от 45 до 68<sup>0</sup>С. Количество заглушенных холодильников увеличилось от 3 до 10 штук. В это время рудная нагрузка в зоне рудного гребня (станции № 6-8) и центральной части печи (станции № 1-2) уменьшалась. Содержание рудной части шихты изменили от 39,1 до 28,6% и

увеличили содержание кокса от 46,4 до 48,6%, который поступал в колошниковое пространство печи со станций № 6-8 углового положения лотка. Уменьшение содержания кокса, формирующего поверхность засыпи со станций № 1-2, составило 1,3% от 4,2 до 2,9%. При этом рудная нагрузка увеличилась в кольцевой зоне колошника, соответствующей станциям № 3-5 углового положения лотка от 0,74 до 0,76, при увеличении содержания кокса от 42,8 до 48,6% и рудной части шихты от 31,5 до 37,1%.

Увеличение рудной нагрузки в периферийной части печи № 10, так же как и на печи № 9, сопровождалось ростом содержания  $\text{CO}_2$  в пристеночной зоне от 16 до 17%, понижением температур периферийного газа от 396 до 298 $^{\circ}\text{C}$  и радиального газа на периферии от 182 до 158 $^{\circ}\text{C}$ . Температура колошникового газа также уменьшилась от 174 до 141 $^{\circ}\text{C}$ .

Доменная печь № 10 работала наиболее интенсивно в период повышенных температур холодильников. В этом периоде увеличение расхода природного газа составило 4 тыс. м<sup>3</sup>/ч от 16 до 20 тыс. м<sup>3</sup>/ч. Расход дутья повысили от 3413 до 3695 м<sup>3</sup>/мин. В результате производительность печи увеличилась от 4262 до 4923 т чугуна в сутки, а удельный расход кокса уменьшился от 454 до 440 кг/т чугуна.

На доменной печи № 4 изучили показатели стабильной работы печи за 425 сут. Интервал температур, равный 21-35 $^{\circ}\text{C}$ , включал в себя 238 сут работы печи. При температурах от 50 до 95 $^{\circ}\text{C}$  печь работала 113 сут.

Содержание материалов, поступающих на станции углового положения лотка по всем видам матриц, было следующим, %:

		Кокс										
Номер станции		11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Период V		0,0	0,1	3,9	10,2	12,2	14,4	15,2	15,4	13,5	15,1	0,0
Период VI		0,0	0,0	4,9	10,9	12,6	7,4	9,0	11,0	21,9	22,3	0,0
		Железорудные материалы										
Номер станции		11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Период V		2,3	31,3	9,3	18,2	25,7	13,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Период VI		27,2	30,0	0,0	0,0	42,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Повышению средних температур холодильников шахты печи от 29 до 59<sup>0</sup>С предшествовало увеличение содержания железорудного материала, поступающего в периферийную зону печи, со станций № 9-11, от 43 до 57,2% при увеличении содержания кокса от 4,0 до 4,9%. Рудная нагрузка в зоне рудного гребня (станции № 6-8) уменьшилась. Содержание кокса, поступающего в центральную часть печи со станций № 1-2, увеличилась от 15,1 до 22,3% при снижении ее со станций № 3-5 от 44,0 до 41,9%. Заглушенных холодильников в период повышенных температур не выявили, против 3 случаев в периоде со средней температурой холодильников 29<sup>0</sup>С.

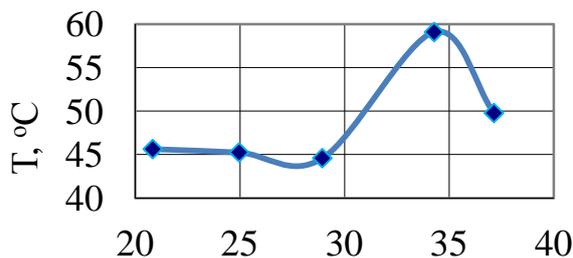
В центральной части печи (станции №1, 2) снизили долю кокса от 4,6 до 3,2% при отсутствии в них железорудных материалов.

На печи № 10 повышение содержания железорудного материала, поступающего со станций 9-11 углового положения лотка от 24% (193 сут) до 35% (580 суток) сопровождалось ростом температур холодильников 1-го, 3-го и 4-го рядов соответственно от 44, 47, 44 до 62, 62, 49<sup>0</sup>С. Среднее увеличение температуры холодильников составило 12<sup>0</sup>С (рисунок 4.1).

Согласно рисунку 4.1 при доле железорудного сырья (ЖРС), поступающего в колошниковое пространство печи со станций № 9-11 углового положения лотка, 20-30% от общего расхода температуры холодильников шахты изменялись незначительно. Существенное увеличение наблюдали при росте ее до 34%, когда был исключен кокс из периферийной зоны печи. Согласно рисунку 4.2 максимум температур приходился на период, в котором пристеночная область печи загружалась одним железорудным сырьем.

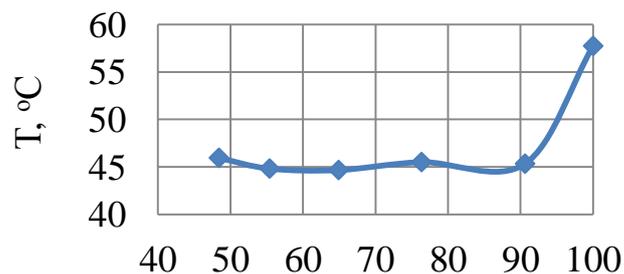
В последующем, несмотря на дальнейшее увеличение содержания железорудного сырья, поступающего на станции № 9-11 углового положения лотка от 34 до 37%, средняя температура холодильников шахты снизилась от 59,1 до 49,8<sup>0</sup>С, поскольку с агломератом в пристеночную зону печи поступал кокс. Увеличение содержания кокса в периферийной зоне печи от 0,27 (636 сут) до 16,14% (146 сут) сопровождалось понижением на 12<sup>0</sup>С средней температуры холодильников 1-го, 3-го и 4-го рядов. При этом в периоде с

повышенными температурами 18 раз перекрывали подачу воды на различные части холодильников в шахте, распаре и заплечиках.



Содержание ЖРС на периферии от общего его количества на всех станциях, %

Рисунок 4.1 – Зависимость температуры холодильников шахты от доли ЖРС, приходящегося на станции № 9-11 углового положения лотка



Содержание ЖРС на периферии от количества шихты в этой зоне, %

Рисунок 4.2 – Зависимость температуры холодильников шахты от доли ЖРС в шихте, формирующей периферийную зону со станций № 9-11

На доменной печи № 9 увеличение содержания рудной части шихты на станции № 9-11 от 26 (348 сут) до 35% (396 сут) сопровождалось повышением температуры 3-го и 4-го рядов холодильников соответственно от 47 и 32 до 49 и 37<sup>0</sup>С. Среднее увеличение температуры холодильников составило 11<sup>0</sup>С. Увеличение доли железорудного материала в периферийной зоне сопровождалось повышением количества заглушенных частей холодильников от 5 до 6 штук.

Рост содержания кокса в периферийной зоне печи от 0,13 (631 сут) до 16,14% (151 сут) сопровождался понижением средней температуры 3-го и 4-го рядов холодильников на 12<sup>0</sup>С и уменьшением числа заглушенных частей холодильников от 8 до 3 штук.

На доменной печи № 4 увеличение содержания рудной части шихты, поступающей на колошник со станций лотка № 9-11, от 42 до 58% сопровождалось увеличением температуры 1-го, 4-го рядов холодильников шахты соответственно от 18; 27 до 49; 52<sup>0</sup>С и понижением в районе 3-го ряда холодильников шахты от 42 до 40<sup>0</sup>С. Среднее увеличение температур холодильников шахты составило 18<sup>0</sup>С.

Таким образом, применительно к условиям работы доменных печей ПАО «ММК» установили рациональный режим загрузки материалов в печь, обеспечивающий уменьшение тепловых нагрузок на систему охлаждения печи. Выявили, что уменьшение содержания железорудного сырья в шихте, формирующей периферийную зону со станций углового положения лотка № 9-11, на 10% сопровождалось снижением средней температуры холодильников шахты на  $2,5^{\circ}\text{C}$  [444, 476, 478].

#### **4.1.2 Доля неофлюсованных окатышей от железорудной части шихты**

На доменных печах № 2, 6, 9, 10 ПАО «ММК», оснащенных компактным бесконусным загрузочным устройством (БЗУ) лоткового типа, 11-ю парными смежными периодами длительностью по 7-10 сут исследовали особенности распределения шихтовых материалов при изменении доли окатышей в интервале от 26 до 55%. Оценили влияние повышения доли окатышей от расхода железорудной части шихты на температуру холодильников и тепловые нагрузки системы охлаждения. В частности, на доменной печи № 2 исследовали два периода, каждый из которых сформирован из трех смежных парных периодов. В первом средневзвешенная доля окатышей составляла 26%, во втором – 35%. На этой же печи двумя смежными периодами исследовали увеличение доли окатышей от 48 до 55%. На доменной печи № 6 долю окатышей в составе шихты в среднем в двух парных периодах увеличивали с 37 до 44%. На доменной печи № 9 исследовали два парных периода. Доля окатышей в них составляла 35 и 41%. На печи № 10 исследовали периоды со средневзвешенной долей окатышей соответственно 39 и 49%. В исследуемые периоды матрицы загрузки оставались постоянными.

На доменной печи № 2 оценили периоды в условиях увеличения доли окатышей с 36 до 62% в условиях изменения матрицы загрузки. В периоде I доля окатышей составляла 36%, в периоде II увеличили до 49%, в периоде III долю окатышей довели до 62%.

В исследуемых периодах на доменной печи № 2 в условиях изменения доли окатышей в интервале 36-62% доля материалов, поступающих на станции углового положения лотка во всем цикле матрицы по периодам, была следующей, %:

		Кокс										
Номер станции		11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Период I		0,0	0,0	0,0	14,3	21,4	21,4	19,0	14,3	4,8	4,8	0,0
Период II		0,0	0,0	3,8	14,3	17,6	19,5	17,1	16,2	4,8	6,7	0,0
Период III		0,0	0,0	5,1	14,3	16,7	20,8	14,9	16,4	4,8	7,1	0,0
		Железорудные материалы										
Номер станции		11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Период I		0,0	0,0	19,4	19,4	19,4	16,7	19,4	5,6	0,0	0,0	0,0
Период II		0,0	2,8	17,8	19,4	19,4	20,6	16,7	3,3	0,0	0,0	0,0
Период III		0,0	0,7	14,6	21,5	21,5	22,2	16,7	2,8	0,0	0,0	0,0

Анализ показателей работы смежных периодов работы доменных печей показывает, что при увеличении доли окатышей в условиях сохранения матрицы загрузки их содержание увеличивалось в периферийной части печи. На это указывает увеличение содержания  $\text{CO}_2$  (рисунок 4.3) в пристеночной зоне печи и понижение температуры радиального газа в этой зоне (таблица 4.1).

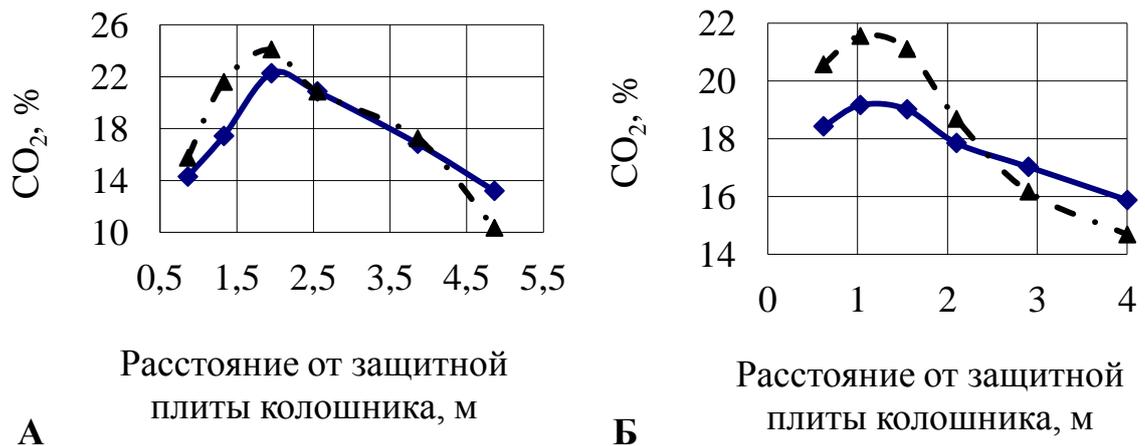


Рисунок 4.3 – Содержание  $\text{CO}_2$  по радиусу доменных печей № 2 (А) и 10 (Б) при доле окатышей 28 и 39% (сплошные линии); 37 и 49% (пунктирные линии)

Таблица 4.1 – Температура газа по радиусу при различной доле окатышей  
в среднем для доменных печей № 2, 4, 6, 10

Доля окатышей	Температура газа по радиусу		
	Периферия	Рудный гребень	Центр
26-40	184	143	331
41-55	177	134	336

При сохранении прежней матрицы загрузки повышение доли окатышей на каждые 5% в интервале от 26 до 55% сопровождалось ростом содержания  $\text{CO}_2$  на периферии и в рудном гребне соответственно на 0,6 и 0,7% абс. и понижением в центре на 1,1% абс. Температура радиального газа на периферии и в рудном гребне уменьшилась соответственно на 4 и 5 $^{\circ}\text{C}$ , а в центральной части печи увеличилась на 3 $^{\circ}\text{C}$ . При этом снижалась температура периферийного газа вверху шахты на 13 $^{\circ}\text{C}$ , температура колошникового газа на 3 $^{\circ}\text{C}$  (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Изменение показателей работы исследуемых доменных печей, характеризующих распределение материалов и газа по радиусу, при увеличении доли окатышей на 5% в интервале от 26 до 55%

Мероприятия	Изменение
Содержание $\text{CO}_2$ в радиальном газе, %: на периферии	+0,6
в рудном гребне	+0,7
в центре	-1,1
Температура радиального газа, $^{\circ}\text{C}$ : на периферии	-4
в рудном гребне	-5
в центре	+2
Температура газа на периферии в шахте печи, $^{\circ}\text{C}$	-13
Температура в газоотводах, $^{\circ}\text{C}$	-3

В результате, самопроизвольное перераспределение железорудных материалов вследствие увеличения доли окатышей в составе шихты отрицательно сказывалось на стойкости кладки доменных печей. При

увеличении их доли в железорудной части шихты существенно повышались температуры холодильников шахты доменных печей. Увеличение доли окатышей от 30 до 55% повышало среднюю температуру холодильников шахты на 10-20<sup>0</sup>С (рисунок 4.4).



Рисунок 4.4 – Изменение температур холодильников шахты доменных печей №2 (А), №9 (Б) и № 10(В) при увеличении доли окатышей

Повышение доли окатышей с 0,36 до 0,49% на доменной печи № 2 в периоде II по сравнению с периодом I при одновременном уменьшении содержания ЖРС на периферии от количества шихты в этой зоне от 100 до 84,4% сопровождалось сохранением средней температуры холодильников шахты.

Увеличение содержания окатышей от железорудной части шихты с 49 до 62% в периоде III по сравнению с периодом II при дополнительном снижении содержания ЖРС на периферии от количества шихты в этой зоне с 84,4 до 75,0% сопровождалось повышением температуры холодильников шахты по всей высоте печи. В районе 1-го ряда холодильников увеличение составило 1<sup>0</sup>С от 51 до 52<sup>0</sup>С, в районе 3-го ряда холодильников шахты – 3<sup>0</sup>С от 54 до 57<sup>0</sup>С, в районе 4-го ряда холодильников шахты – 4<sup>0</sup>С от 56 до 60<sup>0</sup>С, в районе 6-го ряда холодильников – 2<sup>0</sup>С от 48 до 49<sup>0</sup>С.

Максимальные температуры в районе 3-го и 4-го и 6-го рядов соответственно увеличились от 70, 81, 43 до 86, 94, 56<sup>0</sup>С, что сопровождалось повышением градиентов температур соответственно на 16, 13 и 13<sup>0</sup>С. По высоте печи в месте замера температуры разгара шахты № 13, располагающегося над фурмой № 16, температура холодильника выросла от 44 до 56<sup>0</sup>С. Средняя величина градиентов температур по высоте печи увеличилась

от 17 до 20<sup>0</sup>С. Над фурмами № 1-9 минимальные значения градиентов температур повысились в среднем на 2<sup>0</sup>С и колебались в интервале от 4 до 16<sup>0</sup>С.

В целом по печи увеличение доли окатышей от 36 до 62% сопровождалось повышением средней температуры холодильников шахты от 45 до 56<sup>0</sup>С. Это являлось результатом избыточного поступления окатышей в периферийную часть печи, на что указывает повышение температур радиального газа в этой зоне. Температура газа, отбираемого по радиусу печи на расстоянии, равном 0,02 м, от защитной плиты колошника увеличилась с 190 до 204С<sup>0</sup> при повышении температуры в зоне рудного гребня от 158 до 169<sup>0</sup>С и уменьшении в центральной части колошника от 428 до 420<sup>0</sup>С.

Снижение напряженности по силовому взаимодействию потоков шихты и газа путем раскрытия периферии позволило увеличить расход дутья от 2735 до 2897 м<sup>3</sup>/мин при снижении верхнего перепада давления газов от 22,8 до 22,4 кПа. Суточная производительность печи увеличилась на 2,53%.

Длительная работа печи (4 месяца) в условиях повышенного содержания окатышей в интервале 46-65% со средневзвешенной величиной 50% сопровождалось интенсивным истиранием футеровки шахты по всей высоте, на что указывают данные тепловой нагрузки (рисунки 4.5, 4.6).

После 4 месяцев работы печи № 2 с повышенной долей окатышей в составе шихты тепловая нагрузка увеличилась по всей высоте печи. В 3-м ряду шахты над фурмами № 17-19 она достигла 9,13 тыс. ккал/(м<sup>2</sup>·ч) против 5,1 в периоде III. Над фурмами № 5, 6 она увеличилась от 8,2 до 11,4 тыс. ккал/(м<sup>2</sup>·ч). В 4-м ряду холодильников шахты тепловая нагрузка повысилась над фурмами № 1-9, 17-18 и в некоторых местах достигала величины, равной 15,4 тыс. ккал/(м<sup>2</sup>·ч). В районе 5-го ряда холодильников шахты тепловая нагрузка увеличилась по всей окружности. Максимального значения достигала над фурмами № 17-19, равной 11,2 тыс. ккал/(м<sup>2</sup>·ч). В районе 6-го ряда холодильников величина тепловой нагрузки увеличилась над фурмами № 1-3, 17-20 от 1,5 до 4,8 тыс. ккал/(м<sup>2</sup>·ч) (см. рисунок 4.5). В районе 7-го и 8-го рядов повышенные тепловые нагрузки наблюдали в северо-западной части печи. В результате заглушили внутренние или (и) внешние витки холодильников

маратора над фурмами № 4, 5, 7, 8, 10, 14, 17-19 и внутренние витки холодильников заплечиков над фурмами № 3, 4.

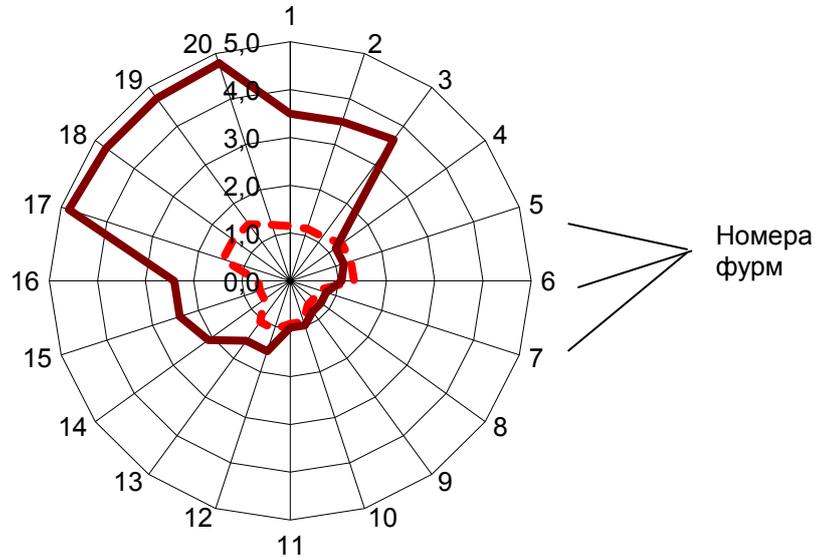


Рисунок 4.5 – Плотность теплового потока по внутренним виткам холодильников 6-го ряда шахты, тыс. ккал/(м<sup>2</sup>·ч), при работе доменной печи № 2 длительностью 4 месяца со средневзвешенной долей окатышей 50% ( — ) и в предшествующие 5 месяцев ( - - - )

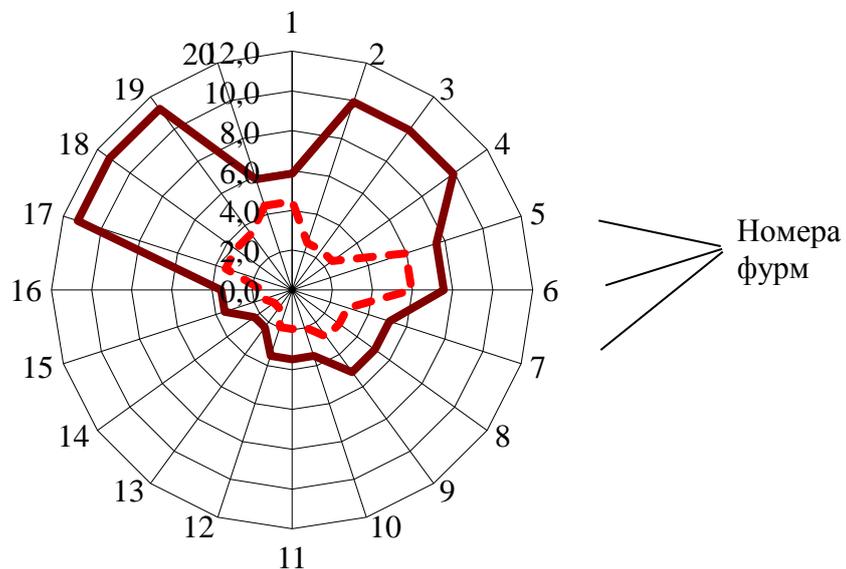


Рисунок 4.6 – Плотность теплового потока по внутренним виткам холодильников 5-го ряда шахты, тыс. ккал/(м<sup>2</sup>·ч) при работе доменной печи № 2 длительностью 4 месяца со средневзвешенной долей окатышей 50% ( — ) и в предшествующие 5 месяцев ( - - - )

Таким образом, при работе доменных печей с долей неофлюсованных окатышей в составе шихты до 37% не требовало мероприятий, компенсирующих отрицательное их воздействие на футеровку печи. При дальнейшем увеличении их содержания целесообразно было изменение режимов загрузки, направленных на частичное их отдаление от пристеночной части печи. В направлении сохранения температуры холодильников шахты печи действовало уменьшение содержания ЖРС на периферии от 100 до 84,4% от количества шихты в этой зоне в условиях кратковременного роста доли окатышей с 36 до 49%. Длительная работа доменных печей ПАО «ММК» (3-6 месяцев) на повышенной средневзвешенной доле окатышей, равной 50%, способствовало выходу из строя холодильников шахты, распара и заплечиков [477].

#### **4.1.3 Параметры режима загрузки и показатели работы печи при выходе холодильников из рабочего состояния**

Из анализа работы доменных печей ПАО «ММК» видно, что при использовании в составе шихты окатышей в количестве более 37% от расхода железорудной части шихты длительностью 3-6 месяцев без использования мероприятий, компенсирующих отрицательное влияние их расхода на стойкость футеровки, начинали выходить из строя холодильники. При этом часто доменные печи работают с превышением доли окатышей 37% длительностью менее 3 месяцев. Периоды работы печи с повышенной долей могут составлять от недели до месяца или двух. При этом процесс повышения доли окатышей имеет периодический характер. Такая технология работы печи тоже отрицательно сказывается на стойкости футеровки печи и системы ее охлаждения. В связи с этим выделили периоды работы доменных печей № 9, 10 ПАО «ММК» с превышением доли окатышей свыше 37% на период от трех недель до двух месяцев, после чего возвращением доли окатышей в рациональный диапазон (менее 37%). После периодического повышения (2-3 раза) выявили периоды, в течение последующего полугодия после последнего

превышения доли окатышей 37%, с выходом холодильников печи из строя. Затем проанализировали параметры работы доменных печей в следующих временных интервалах:

- в момент выхода холодильника из строя;
- в предшествующие сутки;
- за предшествующий месяц;
- за предшествующий квартал;
- за предшествующие полгода.

На доменной печи № 9 в выбранном массиве данных, равном 843 сут, прекращали подачу воды на холодильники шахты, маратора и заплечиков в разные дни, число которых достигало 10. В один из дней могли заглушить несколько холодильников, в другой – один.

Доля материалов, поступающих на станции углового положения лотка во всем цикле матрицы, была следующей, %:

Номер станции	Кокс										
	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
В предшествующие полгода	0,0	1,1	3,0	13,8	16,2	20,9	17,2	16,6	7,0	4,2	0,0
В предшествующий квартал	0,0	0,5	3,0	13,9	16,6	20,9	17,4	17,0	6,8	4,1	0,0
В предшествующий месяц	0,0	0,6	3,4	14,0	16,4	20,6	17,5	16,7	6,4	4,5	0,0
В предшествующие сутки	0,0	1,3	2,9	12,7	14,5	18,8	15,6	15,0	5,7	4,4	0,0
В момент выхода из строя	0,0	1,3	2,9	12,7	14,5	18,8	15,6	15,0	5,7	4,4	0,0
Среднее	0,0	0,9	2,2	13,6	16,2	21,4	17,7	17,3	6,9	3,9	0,0
Номер станции	Руда										
	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
В предшествующие полгода	0,1	12,3	15,9	11,8	14,4	13,3	12,8	10,9	8,5	0,1	0,0
В предшествующий квартал	0,0	13,0	16,2	11,7	13,9	13,6	12,7	10,7	8,1	0,1	0,0
В предшествующий месяц	0,0	13,4	15,6	12,3	14,0	13,2	12,7	10,6	8,0	0,1	0,0
В предшествующие сутки	0,0	12,5	14,1	11,1	12,5	11,8	12,4	9,2	7,3	0,0	0,0
В момент выхода из строя	0,0	12,5	14,1	11,1	12,5	11,8	12,4	9,2	7,3	0,0	0,0
Среднее	0,0	14,4	16,8	11,5	12,8	13,0	12,4	11,6	7,4	0,1	0,0

Основные параметры работы печи усреднили в каждый из дней, в которых произошло прекращение воды на холодильники, и сравнили со средней величиной параметров работы печи за 843 сут.

В момент выхода из строя холодильников доля рудных материалов, поступающих на станции углового положения лотка во всем цикле матрицы, составляла 26,6 %, что ниже средней величины за 843 сут работы печи, равной 31,3%. Доля кокса, поступающего на станции № 9-11, составляла 4,2% против 3,1 в среднем за 843 сут.

По мере удаления от даты, фиксирующей неисправность холодильников, рудная нагрузка в периферийной зоне росла и достигала своего максимума в предшествующий квартал. В этом временном интервале доля рудной части шихты, поступающей на станции № 9-11, составляла 29,2%, кокса – 3,4%. За предшествующие полгода доля руды, поступающая на периферийную зону печи, составляла 28,3%, кокса – 4,1%.

В момент выхода холодильников из строя уровень засыпи составлял 0,9 м, против 1,1 м в предшествующий период времени. Это отрицательно отразилось на температуре холодильников, равной в этот день 40<sup>0</sup>С, что выше средних температур за предшествующие сутки, квартал и полгода, которые были равны соответственно 28, 29, 39, 38<sup>0</sup>С, но ниже, чем за предшествующий месяц, где температура достигала 41<sup>0</sup>С.

Доля окатышей в указанный временной промежуток не превышала 33,2%. Температура газа на периферии под газоотводами и в шахте печи в момент выхода из строя холодильников составляли соответственно 287 и 119<sup>0</sup>С, что ниже средних температур, полученных во всем массиве данных соответственно на 38 и 24<sup>0</sup>С. По мере удаления от даты с выходом холодильников из строя температуры газа увеличивались. Максимальные значения, равные соответственно 325 и 140<sup>0</sup>С, наблюдали в предшествующий квартал и полгода.

Характер изменения температур радиального и колошниковогазогов был такой, как у периферийного газа. По мере удаления от даты с выходом холодильников из строя увеличивалось отношение температур периферийного газа к газу, проходящему в центральной части печи и в рудном гребне, и достигало максимальных значений в предшествующий месяц и полгода. Увеличение составило в центральной части – 0,08, от 0,72 до 0,80, в рудном гребне – 0,03 от 1,55 до 1,58.

На доменной печи № 10 в обрабатываемом массиве данных, включающем 781 сут, выделили 18 дней, где зафиксировали неисправности в работе холодильников шахты, маратора и заплечиков.

В момент выхода из строя холодильников доля рудных материалов, поступающих на станции углового положения лотка № 9-11, во всем цикле матрицы составляла 34,2% против 31,9%, полученных путем усреднения 781 сут работы печи.

По мере удаления от даты с выходом холодильника из строя доля агломерата и окатышей, поступающих в периферийную зону печи, несколько снижалась и в предшествующий квартал составляла 33,6% при загрузке кокса с долей 0,9%, что также выше для рудной составляющей и ниже для кокса, чем в среднем для печи. Доля материалов, поступающих на станции углового положения лотка во всем цикле матрицы, была следующей, %:

Номер станции	Кокс										
	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
В предшествующие полгода	0,0	0,3	0,7	14,3	16,9	17,1	16,9	14,2	16,5	3,0	0,0
В предшествующий квартал	0,0	0,4	0,5	14,3	16,9	17,1	16,9	14,2	16,7	3,0	0,0
В предшествующий месяц	0,0	0,2	0,3	14,3	17,0	17,2	16,9	14,2	16,9	2,9	0,0
В предшествующие сутки	0,0	0,0	0,0	14,3	17,1	17,1	17,1	14,3	17,1	2,9	0,0
В момент выхода из строя	0,0	0,0	0,0	14,3	17,1	17,1	17,1	14,3	17,1	2,9	0,0
Среднее	0,0	0,9	2,3	14,2	16,5	16,9	16,6	14,3	14,9	3,5	0,0
Номер станции	Руда										
	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
В предшествующие полгода	0,0	17,6	15,9	10,4	10,5	9,1	15,4	15,6	5,5	0,0	0,0
В предшествующий квартал	0,0	18,3	15,4	10,7	9,9	9,0	15,1	16,2	5,5	0,0	0,0
В предшествующий месяц	0,0	18,6	15,2	10,8	9,6	8,9	14,9	16,4	5,7	0,0	0,0
В предшествующие сутки	0,0	18,9	15,3	10,6	9,5	8,7	14,8	16,5	5,8	0,0	0,0
В момент выхода из строя	0,0	18,9	15,3	10,6	9,5	8,7	14,8	16,5	5,8	0,0	0,0
Среднее	0,3	15,6	16,0	11,4	11,7	10,6	15,3	14,5	4,4	0,0	0,0

В момент выхода холодильников из строя уровень засыпи составлял 0,9 м, против 1,3 м в среднем для печи. В предшествующий период времени выявлению неисправности холодильников величина уровня засыпи составляла

1 м. При этом интервал температуры холодильников шахты изменялись в пределах 60-62<sup>0</sup>С, против 55<sup>0</sup>С в среднем для печи.

Доля окатышей в предшествующие полгода выявлению неисправности холодильников варьировалась в интервале от 34,5 до 35,7%. По мере удаления от даты, когда обнаруживали неисправность холодильников, температура периферийного, радиального и колошникового газа уменьшались от 10 до 20<sup>0</sup>С.

Таким образом, результаты анализа работы доменных печей № 9 и 10 показывают, что в момент выхода из строя холодильников доля окатышей составляла 33-35%, что ниже критической величины, равной 37%. Прекращению подачи воды на некоторые холодильники шахты, заплечиков и распара предшествовало периодическое повышение доли окатышей свыше 37% от расхода железорудной части шихты на период от трех недель до двух месяцев, что сопровождалось повышенной концентрацией их в пристеночной зоне печи и интенсивному истиранию футеровки. Последующее понижение доли окатышей менее 37% замедляло интенсивность истирания футеровки, но не обеспечивало условия для формирования гарнисажа, что и сопровождалось преждевременным выходом из строя холодильников печи.

Для предотвращения ускоренного износа футеровки печи при доле окатышей более 37% на доменных печах, оснащенных БЗУ лоткового типа, целесообразно разработать мероприятия, обеспечивающие устранение негативного влияния их на кладку печи. В связи с этим проанализировали влияние различных показателей загрузки на величину тепловых нагрузок системы охлаждения и показатели работы печи [477].

#### **4.1.4 Размер колоши и уровень засыпи материалов**

На доменной печи № 4 оценили влияние размеров рудной и коксовой колош на температуры холодильников шахты. При увеличении размера рудной колоши от 31 (316 сут) до 46 т (110 сут) увеличивалась температура холодильников 1-го и 4-го рядов шахты соответственно от 19 и 27 до 54 и

56<sup>0</sup>С. Температура 3-го ряда шахты снизилась на 2<sup>0</sup>С от 40 до 42<sup>0</sup>С. Увеличение средних температур составило 20<sup>0</sup>С. Повышение коксовой колоши от 8 (315 сут) до 12 т (311 сут) сопровождалось увеличением температур холодильников шахты на 20<sup>0</sup>С.

На доменных печах № 2, 4, 9, 10 проанализировали зависимость между уровнем засыпи и температурой холодильников шахты.

На доменной печи № 10 повышение уровня засыпи от 0,8 до 2,2 м сопровождалось понижением температур 1-го, 3-го и 4-го рядов холодильников шахты печи (рисунок 4.7).

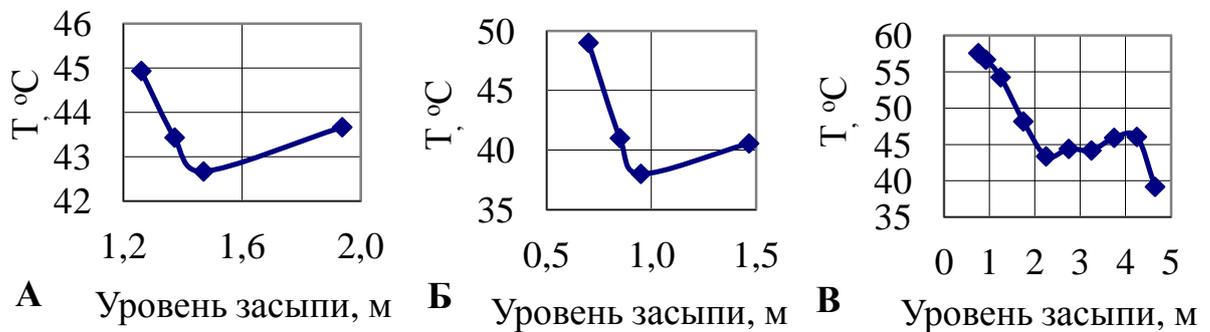


Рисунок 4.7 – Изменение температур холодильников шахты доменных печей № 2 (А), №9 (Б), № 10 (В) при увеличении уровня засыпи

В среднем увеличение от 0,8 (625 сут) до 2,8 м (157 сут) сопровождалось снижением температур 1-го, 3-го и 4-го рядов холодильников шахты печи соответственно от 61, 61 и 49 до 45, 48 и 45<sup>0</sup>С. Уменьшение средней температуры шахты составило 11<sup>0</sup>С. В периоде с уровнем засыпи, равном 0,9 м, заглушали различные части холодильников 17 раз против 1 в периоде с уровнем засыпи 2,8 м.

На доменной печи № 9 увеличение уровня засыпи от 0,78 (378 сут) до 1,08 м (404 сут) сопровождалось уменьшением температур 3-го и 4-го рядов шахты соответственно от 51 и 39 до 47 и 34<sup>0</sup>С. Снижение средней температуры холодильников шахты составило 5<sup>0</sup>С.

На доменной печи № 4 повышение уровня засыпи от 0,99 (271 сут) до 1,38 (155 сут) обеспечило понижение средних температур 1-го, 3-го и 4-го рядов шахты соответственно от 29, 43 и 38 до 26, 38 и 32<sup>0</sup>С.

При анализе смежных периодов длительностью 15-20 сут также отмечается действие уровня засыпи на тепловые нагрузки холодильников шахты печи. Например, на доменной печи № 2 понижение уровня засыпи с 1,61 до 1,45 м сопровождалось уменьшением температур холодильников от 46 до 39<sup>0</sup>С.

Таким образом, уменьшение рудной колоши на 1 т в интервале 31-46 т сопровождалось снижением средней температуры холодильников шахты на 1,3<sup>0</sup>С. Оптимальный по этому показателю уровень засыпи составил 0,95-2,2 м в зависимости от печи.

#### **4.2 Разработка режимов загрузки компонентов шихты в колошниковое пространство печи, обеспечивающих устранение искажений её рабочего профиля**

Наряду с матрицами загрузки, уровнем засыпи и размером колоши распределение материалов по радиусу можно регулировать режимом набора компонентов шихты в бункер БЗУ. Согласно физическому моделированию (см. главу 2) изменением расположения окатышей в бункере БЗУ относительно агломерата можно не только обеспечить наиболее высокую величину показателя равномерности, но и приблизить или отдалить окатыши от пристеночной зоны печи. В связи с этим проанализировали показатели работы доменной печи № 6 ПАО «ММК» при различных режимах загрузки компонентов в шихты в скип и, следовательно, в бункер БЗУ. Выявили закономерности распределения материалов и газов по радиусу колошника при различных режимах загрузки компонентов шихты.

#### **4.2.1. Закономерности распределения материалов и газов по радиусу колошника при различных режимах загрузки компонентов шихты**

Наиболее часто используемым режимом загрузки материалов в скип на доменных печах ПАО «ММК», оснащенных БЗУ лоткового типа, является режим «вперемешку». Основной причиной массового его применения является наиболее высокая интенсивность загрузки приемной воронки, как следствие скипа и доменной печи. Это актуально на печах, работающих с высокой производительностью. Недостатком данного режима является хаотичная загрузка компонентов шихты в скип и, следовательно, бункер БЗУ, что не позволяет оценить последовательность поступления компонентов шихты из бункера в колошниковое пространство печи. В связи с чем в условиях работы печи с высокой долей окатышей, выше 37%, большая их часть может располагаться в пристеночной зоне колошника. Кроме того, такой режим загрузки затрудняет процесс эффективного регулирования распределения добавочных материалов по радиусу в заданные зоны колошника.

Использование режима загрузки «добавки наверх скипа» на доменной печи № 6 ПАО «ММК» сопровождалось преимущественным расположением в нижней части бункера БЗУ окатышей. После чего располагались коксовый орешек, кварцит и агломерат. Такое размещение компонентов шихты в бункере БЗУ обеспечивало поступление окатышей в колошниковое пространство печи первыми. Направление движения лотка от станции углового положения лотка № 11 к станции № 1 матрицы загрузки доменной печи № 6 (таблица 4.3) согласно физическому моделированию способствовало расположению большей части окатышей в периферийной части печи и зоне рудного гребня. Доля окатышей от железорудной части шихты, поступающей в первую кольцевую зону колошника по ходу выпуска в направлении движения лотка со станций матрицы загрузки № 11, 10 и 7, 6 составляла 55-98% (таблица 4.4). Содержание окатышей, поступающих во вторую кольцевую зону колошника со станций № 10, 9 и 6, 5 составляло 18-25%, а со станций № 9, 8 и 5, 4 – не превышало 16%.

Таблица 4.3 – Матрица загрузки доменной печи №6 ПАО «ММК»  
в исследуемые периоды

№ п/п	Содержание скипа	Станции лотка										
		11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
1	К				1	1	1					
2	К							1	1	1		
3	Р		1	1	1							
4	Р						1	1	1			
5	К				1	1	1					
6	К									1	2	
7	Р	1	1	1								
8	Р					1	1	1				
9	К				1	1	1					
10	К						1	1	1			
11	Р		1	1	1							
12	Р					1	1	1				

Таблица 4.4 – Показатели окружной неравномерности распределения  
материалов

Наименование показателей	Доля агломерата, располагающегося под окатышами в бункере БЗУ, %				
	-	0	25	75	100
Режим загрузки добавочных материалов в скип	впере- мешку	верх	верх	верх	дно
Длительность периода, сут	6	6	6	6	6
Показатель равномерности поступления железорудных материалов по ходу их выпуска из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи при физическом моделировании	0,77	0,30	0,79	0,65	0,62
Содержание окатышей по отношению к железорудному сырью в кольцевых зонах колошника в направлении движения лотка, %:					
1-й		55-98	38-55	5-45	0-40
2-й	Нет св.	18-25	37-40	40-50	45-50
3-й		13-16	25-33	40-46	45-46
Коэффициент окружной неравномерности распределения температур $p$	0,39	0,52	0,34	0,45	0,43

Поскольку лоток в печи вращается непрерывно и стартовое положение лотка, при котором осуществляется открытие шихтового затвора, произвольно, то сектора, сформированные преимущественно из агломерата, окатышей или их смеси, перекрываются. В результате можно принять среднее значение содержания окатышей от железорудной части шихты для каждой из кольцевых зон колошника. С учетом количества оборотов на каждой станции углового положения лотка матрицы загрузки (см. таблицу 4.3) и стартового угла наклона лотка содержание окатышей по отношению к железорудному сырью, поступающему со станций № 11-10 и 7-6, составляли соответственно 65 и 55% (таблица 4.5).

В результате поступление в периферийную область печи преимущественно окатышей в периоде II по сравнению с периодом I, имеющих наиболее высокую эквивалентную по поверхности крупность по сравнению с агломератом, вследствие чего обладающих большей газопроницаемостью сопровождалось увеличением температуры газа на периферии. Средняя температура периферийного газа в шахте печи по ее окружности повысилась от 362 до 411<sup>0</sup>С (таблица 4.6), температура газа по радиусу в периферийной части печи увеличилась на 15<sup>0</sup>С от 175 до 190<sup>0</sup>С.

Таблица 4.5 – Содержание окатышей от железорудной части шихты по станциям углового положения лотка в исследуемые периоды

Доля агломерата, располагающегося под окатышами в бункере БЗУ, %	Содержание окатышей от железорудной части шихты по станциям углового положения лотка, %			
	11-10	9-8	7-6	5-4
0	65	18	55	16
25	45	32	44	31
75	28	44	32	43
100	25	46	29	46

Таблица 4.6 – Параметры колошникового газа доменной печи № 6

Наименование показателей	Доля агломерата, располагающегося под окатышами в бункере БЗУ, %				
	-	0	25	75	100
Состав колошникового газа, %:					
CO <sub>2</sub>	18,2	17,3	18,2	17,9	18,1
CO	25,8	25,3	25,2	25,5	25,3
H <sub>2</sub>	8,6	8,5	8,6	8,8	8,7
Степень использования, %:					
CO	41,3	40,5	42,0	41,7	41,2
H <sub>2</sub>	42,2	43,4	44,7	43,2	42,5
Температура газа, °С:					
в газоотводах	166	171	165	167	165
на периферии под газоотводами	168	170	163	185	157
на периферии в шахте	362	411	390	395	393
Градиент температуры газа, °С:					
в газоотводах	18,3	18,6	17,8	17,0	17,1
на периферии под газоотводами	48,7	60,0	42,6	58,7	47,1
на периферии в шахте	145	162	140	142	151
Давление колошникового газа, кПа	129	129	128	132	132
Температура газа по радиусу, °С, на расстоянии от защитной плиты колошника, м: 0,02	175	190	167	162	161
0,37	156	161	148	171	149
0,87	143	144	138	153	138
1,37	131	123	128	133	125
2,22	257	252	255	246	259
3,30	487	542	522	503	532
Температура газа по радиусу, °С					
на периферии $T_{пер}$	175	190	167	162	161
в рудном гребне $T_{гр}$	131	123	128	133	125
в центре печи $T_{ц}$	487	542	522	503	532
$T_{пер}/T_{гр}$	1,34	1,54	1,30	1,22	1,29
$T_{пер}/T_{ц}$	0,36	0,35	0,32	0,32	0,31
$T_{ц}/T_{гр}$	3,72	4,41	4,08	3,78	4,26
$T_{пер}-T_{кол}$ , °С	196	240	225	228	228

Улучшение газопроницаемости в пристеночной зоне печи способствовало повышению количества газа, проходящего через периферийную зону, на что указывает увеличение разности средних температур газа на периферии и в газоотводах на 44°С.

Повышение доли окатышей на периферии в периоде II по сравнению с периодом I обеспечило повышение содержания  $\text{CO}_2$  от 15,6 до 17,3% (таблица 4.7) и вследствие чего увеличение степени использования  $\text{CO}$  от 37,0 до 39,0% (рисунок 4.8 А, таблица 4.7) на расстоянии 0,58 м от защитной плиты колошника.

Таблица 4.7 – Состав газа по радиусу доменной печи № 6

Наименование показателей	Доля агломерата, располагающегося под окатышами в бункере БЗУ, %				
	-	0	25	75	100
Содержание газа $\text{H}_2$ , %, на расстоянии от защитной плиты колошника, м: 0,58	16,9	13,9	11,2	15,5	16,3
0,91	10,4	9,4	8,5	11,0	11,0
1,28	7,3	7,6	7,1	8,7	9,1
1,72	7,9	7,7	7,5	8,9	9,1
2,26	9,5	8,4	8,0	9,1	10,1
3,30	5,5	5,1	5,1	7,9	8,3
Содержание газа $\text{CO}$ , %, на расстоянии от защитной плиты колошника, м: 0,58	26,6	27,0	20,8	24,2	23,5
0,91	23,1	23,9	19,4	18,7	19,3
1,28	21,2	21,2	18,5	18,3	19,0
1,72	23,1	25,2	23,4	21,1	22,1
2,26	28,3	26,5	26,0	24,2	25,1
3,30	35,1	36,1	35,6	33,9	32,9
Содержание газа $\text{Ar}$ , %, на расстоянии от защитной плиты колошника, м: 0,58	0,57	0,34	0,44	0,45	0,45
0,91	0,61	0,38	0,47	0,47	0,48
1,28	0,60	0,42	0,49	0,49	0,50
1,72	0,60	0,44	0,51	0,50	0,51
2,26	0,62	0,47	0,52	0,51	0,52
3,30	0,77	0,60	0,58	0,53	0,56
Содержание газа $\text{CO}_2$ , %, на расстоянии от защитной плиты колошника, м: 0,58	15,6	17,3	21,0	16,1	15,5
0,91	23,4	23,1	25,2	23,9	23,5
1,28	25,7	23,5	26,0	24,3	24,0
1,72	21,7	19,4	20,2	20,8	19,5
2,26	15,0	17,0	16,5	17,1	15,7
3,30	7,0	6,5	8,0	9,5	9,0

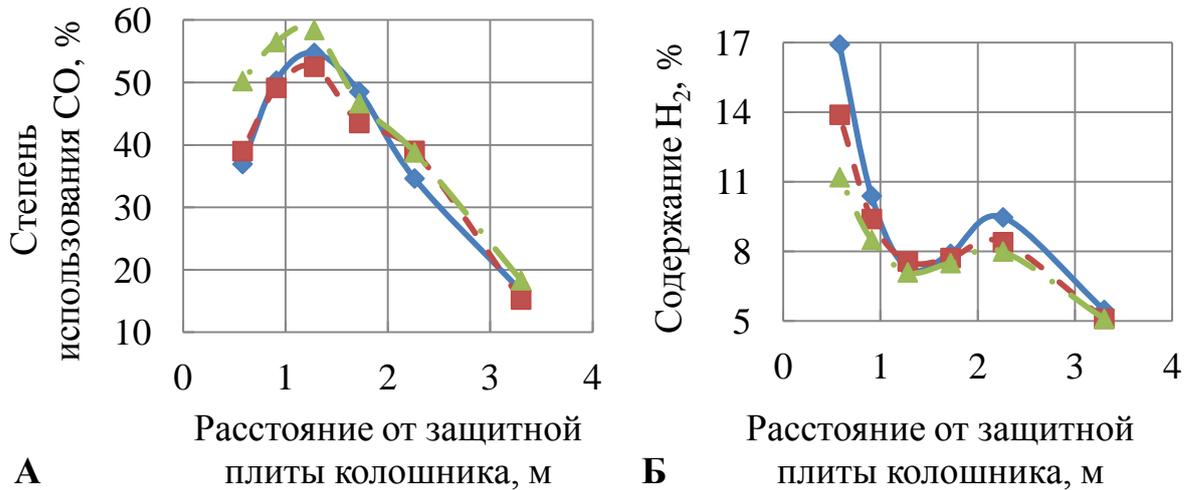


Рисунок 4.8 – Параметры колошниковога газа доменной печи № 6 при режиме загрузки шихтовых материалов «вперемешку» (◆), «добавки наверх скипа» (■), и размещении 25 % агломерата под окатышами в бункере БЗУ и 75 % над ними (▲)

Несмотря на высокое содержание окатышей, поступающих в колошниковое пространство печи со станций углового положения лотка № 6, 7, равное в среднем 55% от расхода железорудной части шихты, в зоне рудного гребня не наблюдали повышения температуры и увеличения содержания  $\text{CO}_2$  как на периферии. Наоборот, температура газа по радиусу в этой зоне уменьшилась от 131 до 123<sup>0</sup>С при понижении содержания  $\text{CO}_2$  от 25,7 до 23,5 %. Это свидетельствует о некотором перетекании окатышей из зоны рудного гребня в промежуточную часть колошника, в то время как на периферии перемещение окатышей направлено в сторону пристеночной зоны печи. В результате отношение температуры газа на периферии к гребню ( $T_{\text{пер}}/T_{\text{гр}}$ ) увеличилось от 1,34 до 1,54.

Преимущественное поступление окатышей в периферийную зону в периоде II по сравнению с периодом I обеспечило увеличение среднего значения отношений степени использования  $\text{CO}$  в периферийной зоне к рудному гребню и центральной части печи  $(\eta_{\text{CO}_{\text{п}}}/\eta_{\text{CO}_{\text{гр}}} + \eta_{\text{CO}_{\text{п}}}/\eta_{\text{CO}_{\text{ц}}})/2$  при понижении отношений степени использования в центре печи к периферии и рудному гребню  $(\eta_{\text{CO}_{\text{ц}}}/\eta_{\text{CO}_{\text{п}}} + \eta_{\text{CO}_{\text{ц}}}/\eta_{\text{CO}_{\text{гр}}})/2$  от 0,39 до 0,35 (таблица 4.8).

Таблица 4.8 – Показатели использования химической энергии газового потока на доменной печи № 6

Наименование показателей	Доля агломерата, располагающегося под окатышами в бункере БЗУ, %				
	-	0	25	75	100
Степень использования CO, %, на расстоянии от защитной плиты колошника, м:					
0,58	37,0	39,0	50,2	40,0	39,7
0,91	50,3	49,2	56,5	56,1	54,9
1,28	54,8	52,5	58,4	57,0	55,8
1,72	48,5	43,5	46,7	49,7	46,9
2,26	34,6	39,1	38,8	41,4	38,5
3,30	16,6	15,3	18,3	21,9	21,5
Степень использования CO, %:					
на периферии ( $\eta_{CO_{II}}$ )	37,0	39,0	50,2	40,0	39,7
в рудном гребне ( $\eta_{CO_{гр}}$ )	54,8	52,5	58,4	57,0	55,8
в центре печи ( $\eta_{CO_{II}}$ )	16,6	15,3	18,3	21,9	21,5
$(\eta_{CO_{II}}/\eta_{CO_{гр}} + \eta_{CO_{II}}/\eta_{CO_{II}})/2$	1,45	1,65	1,80	1,26	1,28
$(\eta_{CO_{II}}/\eta_{CO_{II}} + \eta_{CO_{II}}/\eta_{CO_{гр}})/2$	0,38	0,34	0,34	0,47	0,46
$(\eta_{CO_{гр}}/\eta_{CO_{II}} + \eta_{CO_{гр}}/\eta_{CO_{II}})/2$	2,39	2,39	2,18	2,01	2,00

Сосредоточенное расположение окатышей на периферии благоприятно сказывалось на использовании природного газа. Увеличение его расхода от 17,8 до 18,3 тыс. м<sup>3</sup>/ч при снижении влажности дутья от 1,98 до 1,30 г/м<sup>3</sup> сопровождалось понижением содержания H<sub>2</sub> на периферии от 16,9 до 13,9% и в центре печи от 5,5 до 5,1% (рисунок 4.8, Б.). Среднее уменьшение водорода в радиальном газе составило 0,9% абс. от 9,6 до 8,7% при повышении степени использования H<sub>2</sub> от 42,2 до 43,4%.

Согласно физическому моделированию (см. главу 2) показатель равномерности поступления агломерата и окатышей из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи, рассчитанный по формуле (2.2), составляет 0,30, что ниже, чем при режиме добавки «вперемешку», равному 0,77. Менее равномерное поступление компонентов шихты в колошниковое пространство печи в периоде II по сравнению с периодом I сопровождалось повышением коэффициента неравномерности распределения температур по окружности печи  $p$  с 0,39 до 0,52 (см. таблицу 4.4), повышением градиента температур

газа в газоотводах от 18,3 до 18,6<sup>0</sup>С, на периферии под газоотводами от 48,7 до 60,0<sup>0</sup>С и на периферии в шахте печи от 145 до 162<sup>0</sup>С (см. таблицу 4.6), что свидетельствует об ухудшении равномерности распределения материалов и газов по окружности печи.

Неравномерное распределение материалов по окружности печи при существенном различии материалов по виду в отдельных кольцевых зонах колошника по радиусу в периоде II сопровождалось снижением степени использования СО от 41,3 до 40,5%, что привело к повышению удельного расхода кокса с 458,9 до 462,6 кг/т чугуна. Производительность печи, рассчитанная по фактическому количеству загруженных подач, снизилась с 3637 до 3584 т/сут (таблица 4.9).

Таблица 4.9 – Основные технологические показатели работы доменной печи № 6

Наименование показателей	Доля агломерата, располагающегося под окатышами в бункере БЗУ, %				
	-	0	25	75	100
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна:					
фактический	458,9	462,6	456,5	457,9	458,6
приведенный	-	465,0	457,3	458,4	462,8
Расход коксовой фракции, кг/т чугуна	20,0	20,8	20,1	20,2	18,6
Производительность, т/сут:					
по фактическому количеству загруженных подач	3637	3584	3693	3644	3672
приведенная	-	3612	3693	3667	3663
Расход, кг/т чугуна:					
сырьевых материалов	1713	1726	1711	1704	1694
в том числе кварцита	2,5	4,8	1,8	1,2	0,9
Доля окатышей от ЖРС, %	42,3	38,1	38,4	36,6	37,4
Рудная нагрузка, т/т	3,4	3,5	3,5	3,5	3,5
Содержание Fe в шихте, %	57,4	56,9	57,4	57,7	57,9
Вынос пыли, кг/т чугуна	10,16	9,21	8,46	8,42	8,38
кг/т шихты	6,0	5,40	5,0	5,0	5,0
Расход: дутья, м <sup>3</sup> /мин	3004	2982	2965	2962	2956
м <sup>3</sup> /т чугуна	1189	1198	1156	1171	1159
природного газа м <sup>3</sup> /т чугуна	115,4	119,4	112,6	119,3	119,5
тыс. м <sup>3</sup> /ч	18,1	18,3	18,0	18,7	18,8
Содержание кислорода, %	26,8	26,3	26,7	26,6	26,3

На понижение фактического производства дополнительное влияние оказывало уменьшение содержания железа в шихте от 57,4 до 56,9%, снижение расхода дутья от 3004 до 2982 м<sup>3</sup>/мин при понижении содержания кислорода в нем на 0,5%. Таким образом, производительность печи в периоде II, приведенная к условиям периода № I, составила 3612 т/сут.

Изменение режимов загрузки на доменных печах № 4 и 9 ПАО «ММК» «вперемешку» на «добавки наверх скипа» при доле окатышей 32-35% также сопровождалось улучшением газопроницаемости в пристеночной зоне печи при уменьшении окружной равномерности распределения материалов и газов, на что указывает увеличение коэффициента неравномерности  $p$  с 0,51 до 0,72. При этом удельный расход кокса увеличился в среднем на 6 кг/т чугуна при понижении производительности более чем на 50 т/сут.

В периодах III и IV работы доменной печи № 6 оставили режим загрузки материалов в скип «добавки наверх». Друг от друга периоды отличались количеством агломерата, располагающегося под окатышами в бункере БЗУ. В периоде III под добавочными материалами располагалось 25% агломерата от его расхода, в периоде IV – 75 %. Обеспечили это внесением изменения в систему загрузки. Количество агломерата, которое необходимо располагать в бункере БЗУ под окатышами обозначили как агломерат добавочный, что обеспечило его выгрузку на ленту конвейера совместно с добавочными материалами (окатыши, коксовая фракция и кварцит) после агломерата. Размещение добавочного агломерата в бункерах, располагающихся в хвостовой части конвейера, обеспечивало поступление его в приемный бункер последним после агломерата и окатышей. Таким образом, в периоде III в скипе материалы располагались в следующем порядке: 75% агломерата от его расхода размещали внизу скипа, затем окатыши и кварцит, после чего оставшиеся 25% агломерата. В периоде IV долю основного и добавочного агломерата поменяли, что сопровождалось поступлением 75% агломерата в нижнюю часть скипа. В периоде V из системы загрузки исключили агломерат добавочный и установили режим

загрузки «добавки на дно скипа». Это обеспечило поступление в скип всего количества агломерата после коксовой фракции, кварцита и окатышей. Таким образом, данный режим обеспечивал загрузку окатышей в бункер БЗУ последними.

Согласно экспериментам, проведенным на физической модели БЗУ лоткового типа, загрузка в бункер БЗУ окатышей между порциями, сформированными из агломерата, в количестве 25 и 75% от его массы, расположенными в бункере БЗУ соответственно под и над окатышами, обеспечивает формирование слоя шихты в периферийной зоне из 45% окатышей и 55% агломерата (см. таблицу 4.5). Доля окатышей от железорудной части шихты, поступающей с остальных станций, варьировалась в интервале 31-44%. Такое соотношение железорудных материалов близко к оптимальному для условий периода III, где доля окатышей от расхода железорудного сырья составляла 38,1%.

Величина показателя равномерности поступления железорудных материалов из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи, рассчитанного по формуле (2.2), составляла 0,79, что выше на 0,49, по сравнению с показателем, получаемым при моделировании режима «добавки на дно бункера БЗУ».

Равномерное поступление материалов на лоток БЗУ доменной печи № 6 в периоде III по сравнению с периодом II сопровождалось уменьшением коэффициента неравномерности распределения температур по окружности печи  $r$  с 0,52 до 0,34 (см. таблицу 4.4), снижением градиента температуры в газоотводах от 18,6 до 17,8<sup>0</sup>С, на периферии под газоотводами от 60 до 47,1<sup>0</sup>С и на периферии в шахте печи от 162 до 140<sup>0</sup>С.

Улучшение равномерности распределения материалов и газов по окружности печи сопровождалось повышением степени использования СО с 40,5 до 42,0% и водорода с 43,4 до 44,7% (см. таблицу 4.6). При этом наиболее высокое увеличение степени использования СО и H<sub>2</sub> наблюдали на периферии (см. рисунок 4.8, таблицу 4.8), что свидетельствует об избыточной

газопроницаемости пристеночной зоны печи в периоде II и нормализации распределения газового потока по радиусу в периоде III, в котором количество газов, проходящих через периферию, уменьшилось за счет отдаления части окатышей от пристеночной зоны печи, на что указывает уменьшение разности между температурами на периферии и в газоотводах с 240 до 224°С. Также в периоде III по сравнению с периодом II увеличилось отношение  $(\eta_{\text{CO}_{\text{п}}}/\eta_{\text{CO}_{\text{гр}}} + \eta_{\text{CO}_{\text{п}}}/\eta_{\text{CO}_{\text{ц}}})/2$  на 0,15 при сохранении  $(\eta_{\text{CO}_{\text{ц}}}/\eta_{\text{CO}_{\text{п}}} + \eta_{\text{CO}_{\text{ц}}}/\eta_{\text{CO}_{\text{гр}}})/2$  и снижение отношений  $T_{\text{пер}}/T_{\text{гр}}$  и  $T_{\text{пер}}/T_{\text{ц}}$  соответственно на 0,24 и 0,03 (см. таблицу 4.6).

Перераспределение материалов в периоде III по сравнению с периодом II сопровождалась повышением производительности печи от 3584 до 3693 т/сут и снижением удельного расхода кокса от 462,5 до 456,5 кг/т чугуна (см. таблицу 4.9).

Расположение в бункере БЗУ агломерата в количестве 75 и 100% по окатышами соответственно в периодах IV и V обеспечило максимальное отдаление окатышей от периферии. Согласно физическому моделированию использование таких режимов загрузки сопровождается поступлением одного агломерата в начале выпуска. Длительность ссыпания одного агломерата соответствует полуокружности первой кольцевой зоны по ходу движения лотка. В условиях направления его перемещения от периферии к центру полуокружность периферийной части печи заполняется одним агломератом. Затем агломерат и окатыши поступают в колошниковое пространство печи совместно. В результате содержание окатышей по отношению к железорудному сырью в первой кольцевой зоне колошника по направлению движения лотка в среднем в периодах IV и V составляет 25-28% против 45 в периоде III.

На отдаление окатышей от периферии указывает понижение температуры радиального газа на периферии с 167 до 162°С. Также на перераспределение материалов по радиусу, сопровождающееся ухудшением газопроницаемости на периферии и улучшением в зоне рудного гребня и промежуточной ее части, за счет поступления в них большего количества окатышей в периоде IV по сравнению с периодом III, указывает уменьшение содержания  $\text{CO}_2$  в

радиальном газе, отобранном на расстоянии 0,58-1,28 м от защитной плиты колошника и увеличении ее величины на расстоянии 1,72-3,3 м (см. таблицу 4.7). В результате степень использования СО в периоде IV по сравнению с периодом III повысилась в зоне рудного гребня и центральной части печи при понижении на периферии (см. таблицу 4.8, рисунок 4.9). В периоде V по сравнению с периодом III повышение степени использования СО наблюдали в центральной части при понижении в зоне рудного гребня и на периферии.

Содержание водорода на периферии и в осевой зоне повысилось согласно рисунку 4.9 при постоянном расходе природного газа и понижении расхода водяного пара от 3,14 до 1,83 г/м<sup>3</sup>. Это свидетельствует о снижении степени использования водорода в этих зонах печи. В целом для печи степень использования водорода уменьшилась от 44,7 до 43,2 %.

В среднем степени использования СО и Н<sub>2</sub> понизились соответственно от 42,0 до 41,7%, от 44,7 до 43,2% в периоде IV по сравнению с периодом III и от 41,7 до 41,2%, от 43,2 до 42,5% в периоде V по сравнению с периодом IV. Одной из причин уменьшения величины степени использования газавосстановителя в периодах IV и V по сравнению с периодом III являлось ухудшением равномерности поступления агломерата и окатышей из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи, на что указывает снижение показатели равномерности, полученного по результатам физического моделирования, с 0,79 в периоде III до 0,65 и 0,62 соответственно в периодах IV и V. Ухудшение равномерности распределения материалов по окружности колошника сопровождалось снижением равномерности распределения газового потока (коэффициент окружной неравномерности  $r$  увеличился в периодах IV и V по сравнению с периодом III с 0,34 до 0,45 и 0,43 соответственно) (см. таблицу 4.4). Увеличился градиент температур газа на периферии в шахте печи и под газоотводами. Это сопровождалось увеличением удельного расхода кокса с 456,5 в периоде III до 457,9 в периоде IV и 458,6 кг/т чугуна в периоде V (см. таблицу 4.9). Производительность печи в последних периодах понизилась по сравнению с периодом III согласно таблице 4.9.

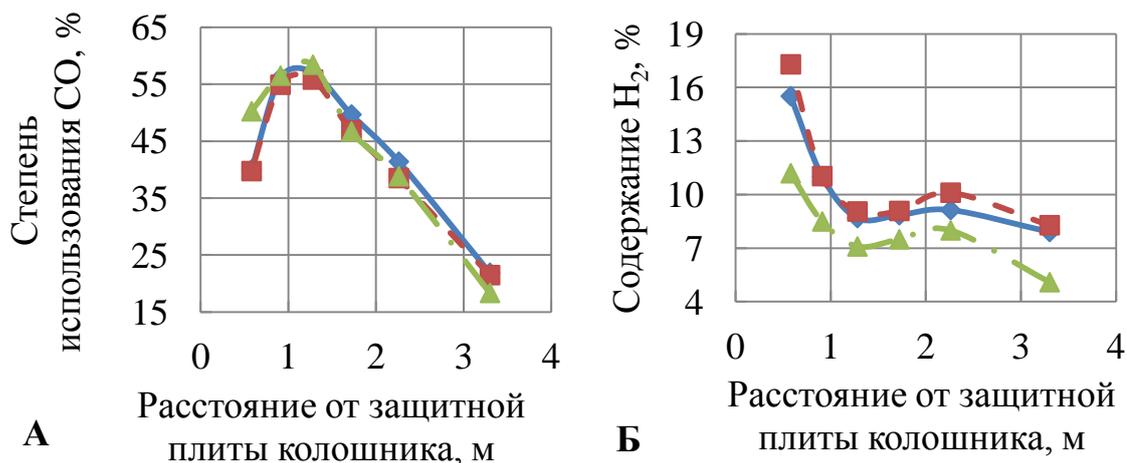


Рисунок 4.9 – Параметры колошникового газа доменной печи доменной печи № 6 при размещении окатышей над агломератом (■) в слое агломерата между порциями, сформированными в количестве 25 и 75% (▲), 75 и 25% (▲) от массы агломерата, расположенными в бункере БЗУ соответственно под и над окатышами

Рассчитали температуру начала и конца плавления железорудных материалов [479, 481] по радиусу (таблицы 4.10, 4.11) для доменных печей № 4, 6 и 9 ПАО «ММК», работающих с режимами загрузки добавочных материалов, в том числе окатышей, на дно, навверх скипа и в слой агломерата.

Таблица 4.10 – Температура плавления материалов для различных режимов загрузки добавочных материалов в бункер БЗУ

Доля агломерата, располагающегося под окатышами в бункере БЗУ, %	Температура начала $T_{\text{нп}}$ и конца $T_{\text{кп}}$ плавления железорудных материалов по станциям углового положения лотка, %							
	11-10		9-8		7-6		5-4	
	$T_{\text{нп}}$	$T_{\text{кп}}$	$T_{\text{нп}}$	$T_{\text{кп}}$	$T_{\text{нп}}$	$T_{\text{кп}}$	$T_{\text{нп}}$	$T_{\text{кп}}$
0	1140	1441	1211	1406	1154	1433	1215	1405
25	1166	1427	1188	1417	1167	1427	1189	1416
75	1194	1414	1169	1426	1188	1417	1170	1425
100	1197	1412	1164	1428	1191	1415	1164	1428

Таблица 4.11 – Температурный интервал плавления ЖРС для различных режимов загрузки добавочных материалов в бункер БЗУ

Доля агломерата, располагающегося под окатышами в бункере БЗУ, %	Температурный интервал плавления железорудных материалов по станциям углового положения лотка, %				Стандартное отклонение
	11-10	9-8	7-6	5-4	
0	301	195	279	190	57,1
25	262	229	259	227	18,8
75	220	257	229	255	18,6
100	215	264	225	264	25,8

Из таблиц 4.10, 4.11 следует, что при расположении окатышей в нижней части бункера БЗУ в зонах по радиусу печи, соответствующим станциям углового положения лотка № 11-10 и 7-6, наблюдаются наиболее низкие температуры начала плавления и наиболее высокие температуры конца плавления. В остальных зонах по радиусу печи температурный интервал плавления был значительно меньше и составлял 190-195<sup>0</sup>С против 279-301<sup>0</sup>С в зонах интенсивного поступления окатышей. Такое высокое различие между температурами начала и конца плавления по радиусу печи сопровождалось повышенной газопроницаемостью в нижней части доменных печей № 4 и 6 ПАО «ММК» за счет прохода газа преимущественно через зону с наименьшим интервалом плавления, соответствующим станциям углового положения лотка № 9-8 и 5-4.

Смена режима загрузки железорудных материалов с добавки на дно бункера БЗУ на добавки наверх или в слой агломерата обеспечивало повышение равномерности температурного интервала плавления железорудных материалов по радиусу печи. Стандартное отклонение распределения интервала температур уменьшилось с 57,1 в периоде с расположением окатышей в нижней части бункера БЗУ до 25,8 и 18,7 соответственно при размещении их в бункере последними и в слое агломерата. Повышение равномерности температурного интервала при переходе с режима загрузки «добавки на дно

бункера БЗУ» на режим «добавки на верх бункера БЗУ» или загрузку окатышей в слой агломерата повышало напряженность по силовому взаимодействию потоков шихты и газа в нижней части доменных печей № 4, 6 и 9, на что указывает рост коэффициента сопротивления шихты движению газового потока в низкотемпературной зоне в среднем согласно таблицам 4.12 и 3.10.

Таблица 4.12 – Показатели газодинамического режима работы доменной печи № 6

Наименование показателей	Доля агломерата, располагающегося под окатышами в бункере БЗУ, %				
	-	0	25	75	100
Коэффициент сопротивления шихты движению газов:					
на колошнике	0,29	0,27	0,32	0,31	0,26
в горне	7,7	8,0	8,1	8,5	8,3
Выход фурменного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна	1575	1580	1504	1558	1534

Переход с режимов загрузки окатышей на дно или верх бункера БЗУ на загрузку их в слой агломерата сопровождается умеренным открытием центральной части печи. В условиях повышения равномерности распределения железорудных материалов по радиусу колошника это приводило к увеличению коэффициента сопротивления шихты движению газа в верхней части доменных печей № 4, 6 и 9 согласно таблицам 4.12 и 3.10.

#### **4.2.2 Предотвращение риска повышения температуры холодильников шахты применением разработанных режимов загрузки**

На доменных печах № 4 и 6 ПАО «ММК» двумя парными периодами оценили влияние разработанного режима загрузки, обеспечивающего отдаление окатышей от пристеночной зоны печи, на температуру холодильников шахты при сохранении доли окатышей в составе шихты, равной 0,38. На доменных печах № 2, 4, 6 и 9 ПАО «ММК» шестью парными периодами оценили влияние отдаления окатышей от футеровки печи на

температуру холодильников шахты при увеличении содержания окатышей в составе шихты в среднем на 8 % в интервале от 35 до 49%.

Результаты представили на примере работы доменных печей № 9 и 4. На печи № 9 исследовали два смежных периода, отличающиеся содержанием окатышей в пристеночной зоне колошника по отношению к железорудному сырью. В первом периоде оно составляло 66% (таблица 4.13). Во втором 15% при одинаковой общей доле окатышей от расхода ЖРС, равной 38%.

Таблица 4.13 – Основные технологические показатели работы доменных печей № 9 и 4

Наименование показателей	Содержание окатышей в пристеночной зоне колошника по отношению к железорудному сырью, %			
	66	15	63	30
Доменная печь	9		4	
Режим загрузки добавочных материалов в скип	верх	дно	верх	дно
Длительность периода, сут	12	14	11	12
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна:				
фактический	474,4	471,6	490,7	488,8
приведенный	-	474,3	-	489,0
Производительность, т/сут:				
по фактическому количеству загруженных подач	3983	4049	3290	3393
приведенная	-	4026	-	3325
Доля окатышей от ЖРС, %	38	38	38	45
Степень использования, % CO	43,6	42,9	44,1	44,7
H <sub>2</sub>	36,1	36,8	36,9	37,1
Рудная нагрузка, т/т	3,58	3,62	3,5	3,5
Расход: дутья, м <sup>3</sup> /мин	3580	3602	2675	2710
природного газа, тыс. м <sup>3</sup> /ч	13,7	14,6	12,7	12,9
Содержание кислорода, %	24,1	24,8	27,6	27,2
Температура газа по радиусу, °С:				
на периферии $T_{\text{пер}}$	120	113	280	253
в рудном гребне $T_{\text{гр}}$	86	85	244	205
в центре печи $T_{\text{ц}}$	305	317	331	340
$T_{\text{пер}} - T_{\text{коль}}$ , °С	137	119	153	164

На доменной печи № 4 предотвратили риск повышения температуры холодильников шахты при повышении их содержания в составе железорудной части шихты с 38 до 45% путем уменьшения доли окатышей в пристеночной зоне колошника по отношению к железорудному сырью от 63 до 30% (см. таблицу 4.13).

На доменной печи № 9 уменьшение доли окатышей, поступающих в периферийную зону печи, сопровождалось понижением разности средних величин температур периферийного газа в шахте по окружности и в газоотводах на  $18^{\circ}\text{C}$  (см. таблицу 4.13), что указывает на уменьшение количества газа, проходящего через периферийную зону. Увеличение количества газа, проходящего через центр, сопровождалось ростом температур радиального газа в нем на  $12^{\circ}\text{C}$ , при понижении ее в периферийной зоне соответственно на  $7^{\circ}\text{C}$ . Перераспределение материалов по радиусу обеспечило уменьшение степени использования CO от 43,6 до 42,9% при повышении степени использования водорода с 36,1 до 36,8% (см. таблицу 4.13).

Отдаление окатышей от пристеночной зоны печи № 9 уменьшало негативное воздействие на футеровку. Средняя температура холодильников шахты печи уменьшилась в опытный период по сравнению с базовым на  $3,6^{\circ}\text{C}$  (таблица 4.14). Снизилась как максимальные температуры в 3-м и 4-м рядах соответственно на 2 и  $9^{\circ}\text{C}$ , так и минимальные на  $1^{\circ}\text{C}$ . Уменьшились средние значения градиентов температур холодильников шахты по высоте на  $2^{\circ}\text{C}$  и окружности на  $5^{\circ}\text{C}$ .

Отдалением доли окатышей от кладки печи № 4 при одновременном увеличении их доли от 38 до 45% предотвратили возможное увеличение температуры холодильников шахты на  $7,7^{\circ}\text{C}$ . В результате увеличение средней температуры холодильников шахты составило только  $0,8^{\circ}\text{C}$  (см. таблицу 4.14). Это являлось результатом перетекания части окатышей в периферийную зону колошника при увеличении их содержания в составе шихты. На это указывает и снижение средней температуры газа на периферии, замеренной по окружности

верхней части шахты печи от 327 до 292<sup>0</sup>С, уменьшение температуры газа на 27<sup>0</sup>С в радиальных термопарах, размещенных на расстоянии 0,97 м от кладки печи. Рост разности средних величин температур периферийного газа в шахте по окружности и в газоотводах от 153 до 164<sup>0</sup>С (см. таблицу 4.13) указывает на повышение количества газа, проходящего в периферийной зоне при загрузке 45% окатышей на дно скипа.

Таблица 4.14 – Температура холодильников шахты доменных печей № 9 и 4

Наименование показателей	Содержание окатышей в пристеночной зоне колошника по отношению к железорудному сырью, %			
	66	15	63	30
Средние температуры холодильников шахты, °С:				
1-го ряда	-	-	21,1	20,3
3-го ряда	54,5	49,8	52,3	53,9
4-го ряда	45,4	42,8	53,9	54,7
Среднеарифметическая температура, °С	49,8	46,2	42,2	43,0
Максимальные температуры холодильников шахты, °С:				
1-го ряда	-	-	22	21
3-го ряда	79	77	145	185
4-го ряда	62	53	197	206
Минимальные температуры холодильников шахты, °С:				
1-го ряда	-	-	20	20
3-го ряда	31	30	21	20
4-го ряда	37	36	19	19
Среднее значение градиентов температур холодильников шахты по высоте, °С	48	46	41	43
Среднее значение градиентов температур холодильников по окружности, °С	52	47	108	118

Работа доменных печей № 6, 9 длительностью два месяца при доле окатышей 38–41% с использованием режима загрузки, отдаляющего окатыши от футеровки, способствовало сохранению стойкости системы охлаждения шахты, распара и заплечиков вследствие понижения их средних температур на  $6,3^{\circ}\text{C}$ .

#### **4.2.3 Разработка и реализация технологии загрузки в доменную печь материалов, формирующих гарнисаж в горне**

На доменных печах № 2, 4 ПАО «ММК» исследовали влияние режимов загрузки титаномагнетитовой руды на плотность теплового потока внутренних витков первого, второго и третьего рядов холодильников [482, 483].

В базовых периодах титаномагнетитовую руду в составе шихты доменных печей не использовали. В опытных периодах длительностью по 44 сут ее загружали в количестве 31,2 кг/т чугуна на печь № 4 и 16,7 кг/т чугуна на печь № 2 (таблица 4.15, 4.16). Такой расход титаномагнетитовой руды на доменной печи №4 обеспечил повышение содержания  $\text{Ti}$  в чугуне на 0,029% с 0,054 до 1,083% и  $\text{TiO}_2$  в шлаке на 0,40% с 0,65 до 1,053% (таблица 4.15). Повышение содержания  $\text{Ti}$  в чугуне и  $\text{TiO}_2$  в шлаке на доменной печи № 2 составляло соответственно 0,099 и 0,32% (таблица 4.16).

На доменной печи № 4 титаномагнетитовую руду загружали во второй рудный скип (таблица 4.17), содержимое которого поступало на станции углового положения лотка № 10-8 матрицы загрузки (таблица 4.18).

Режим загрузки добавочных материалов «на дно скипа» при двухскиповой загрузке шихты в бункер БЗУ обеспечивал размещение титаномагнетитовой руды в слое железорудного сырья. Физическое моделирование такого режима загрузки показало, что титаномагнетитовая руда поступала из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи согласно рисунку 4.10, А.

Таблица 4.15 – Плотность теплового потока горна доменной печи № 4  
до использования титаномагнетитовой руды и после ее загрузки  
в течение 44 суток

Наименование показателей	Периоды		
	базовый	опытный	контрольный
Количество суток	5	44	
Расход титаномагнетитовой руды, кг/т чугуна	-	31,2	
Содержание $TiO_2$ в шлаке, %	0,65	1,053	
Прирост $TiO_2$ в шлаке от базового периода, %	-	+0,40	-
Содержание $Ti$ в чугуне, %	0,054	0,083	
Прирост $Ti$ в чугуне от базового периода, %	-	+0,029	
Содержание в чугуне $Si$ , %	0,84	0,75	
Плотность теплового потока по внутренним виткам холодильников горна, тыс. ккал/( $m^2 \cdot ч$ ):			
1-го ряда	4,11	-	3,74
2-го ряда	5,02	-	4,89
3-го ряда	6,71	-	6,29
Снижение величин плотности теплового потока по внутренним виткам холодильников после загрузки титаномагнетитовой руды в течение 45 сут по отношению к базовому периоду, %:			
1-го ряда		-	10,0
2-го ряда		-	2,8
3-го ряда		-	6,8
Среднее по трем рядам		-	6,5

Таблица 4.16 – Плотность теплового потока горна доменной печи № 2  
до использования титаномагнетитовой руды и после ее загрузки  
в течение 44 суток

Наименование показателей	Периоды		
	базовый	опытный	контрольный
Количество суток	7	44	
Расход титаномагнетитовой руды, кг/т чугуна	-	16,7	
Содержание $TiO_2$ в шлаке, %	0,84	1,16	
Прирост $TiO_2$ в шлаке от базового периода, %	-	+0,32	-
Содержание $Ti$ в чугуне, %	0,079	0,099	
Прирост $Ti$ в чугуне от базового периода, %	-	+0,020	
Содержание в чугуне $Si$ , %	0,89	0,80	
Плотность теплового потока по внутренним виткам холодильников горна, тыс. ккал/( $m^2 \cdot ч$ ): 1-го ряда	3,12	-	2,47
2-го ряда	8,73	-	8,03
3-го ряда	4,99	-	4,19
Снижение величин плотности теплового потока по внутренним виткам холодильников после загрузки титаномагнетитовой руды в течение 45 сут по отношению к базовому периоду, %: 1-го ряда		-	20,4
2-го ряда			8,0
3-го ряда			16,1
Среднее по трем рядам			14,8

Таблица 4.17 – Содержимое рудных скипов доменной печи № 4  
в исследуемые периоды

Масса компонентов шихты, поступающей на станции углового положения лотка матрицы загрузки, кг	Периоды	
	базовый	опытный
№ 10-8 (1-й рудный скип без выгрузки):		
– коксовая фракция	-	300
– окатыши Михайловские	5100	5100
– окатыши Соколовские	1215	1215
– агломерат	10685	10685
– титаномагнетитовая руда	-	390
№ 6-4 (2-й рудный скип с выгрузкой):		
– окатыши Михайловские	5100	5100
– окатыши Соколовские	825	825
– агломерат	10685	10685
– коксовая фракция	300	-
– кварцит	278	210

Таблица 4.18 – Матрицы загрузки доменных печей № 4, и 2 в исследуемые периоды (К – кокс, Р – железорудная часть шихты)

Вид материала для ДП 4	Количество оборотов лотка по станциям 1-11 и порциям материалов К, Р на доменных печах																				Вид материала для ДП 2	
	Доменная печь № 4										Доменная печь № 2											
	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	11	10	9	8	7	6	5	4	3		2
К				1	1	1									1	1	1					К
К							1	1	1						1	1	1					К
Р		1	1	1													1	1		1		К
Р						1	1	1							1	1	1					Р
К				1	1	1									1	1	1					Р
К									1	2					1	1	1					Р
Р		1	1	1											1	1	1					К
Р					1	1	1									2			1			К
К				1	1	1											2	1				К
К						1	1	1							1	1	1					Р
К									2						1	1	1					Р
Р		1	1	1												1	1	1				Р
Р					1	1	1								1	1	1	1				К
К				1	1	1									1	1	1					К
К							1	1										1	1	1		К
Р		1	1	1											2	1						Р
Р						1	1	1									1	1	1			Р
К				1	1	1										2	1					Р

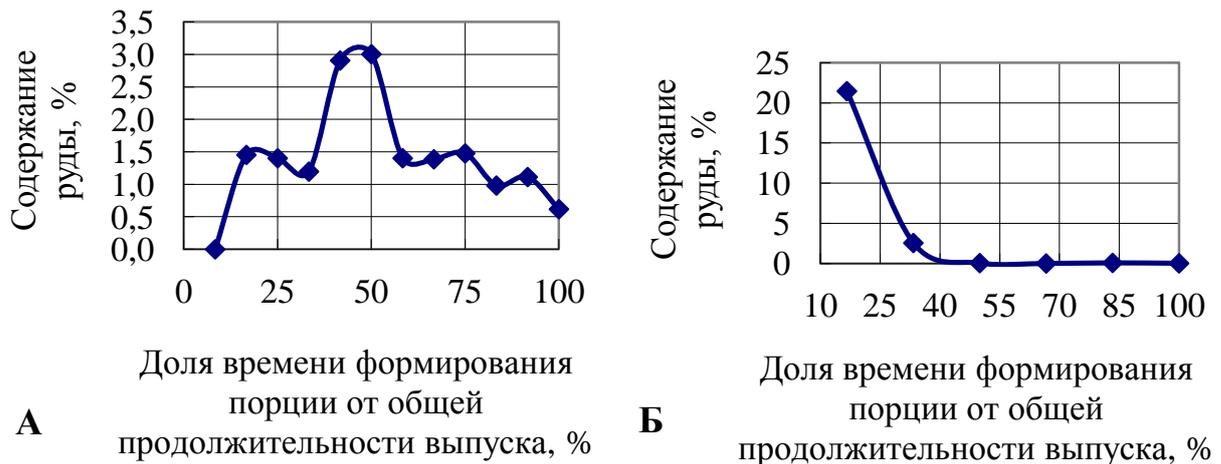


Рисунок 4.10 – Содержание титаномагнетитовой руды по мере истечения ее совместно с железорудным сырьем из шихтового бункера БЗУ при расположении его в слое компонентов шихты (А) и в нижней части бункера БЗУ (Б)

Из рисунка 4.10, А следует, что максимальное содержание титаномагнетитовой руды было в порции, сформированной после 40-50% времени от общей продолжительности выпуска. При используемой матрице загрузки (см. таблицу 4.18) и направлении движения лотка от периферии к центру максимальное количество титаномагнетитовой руды приходится на станцию углового положения лотка №8. Таким образом, можно предположить, что титаномагнетитовая руда располагалась преимущественно между периферийной частью печи и зоной рудного гребня.

На доменной печи №2 титаномагнетитовую руду загружали в первый рудный скип (таблица 4.19) содержимое которого поступало на станции углового положения лотка № 9-7 матрицы загрузки (см. таблицу 4.18).

Режим загрузки добавочных материалов «наверх скипа» обеспечивал расположение титаномагнетитовой руды внизу бункера БЗУ под железорудным сырьем. Физическое моделирование такого режима загрузки показало, что титаномагнетитовая руда поступала из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи в начале выпуска согласно рисунку 4.10, Б. Таким образом обеспечили поступление титаномагнетитовой руды в пристеночную зону колошника.

Таблица 4.19 – Содержимое рудных скипов доменной печи № 2

Масса компонентов шихты, поступающей на станции углового положения лотка матрицы загрузки, кг	Режим загрузки добавочных материалов	
	вперемешку	наверх скипа
Номер периода	I	II
№ 9-7 (1-й рудный скип с выгрузкой):		
– агломерат	1650	1650
– окатыши Соколовские	12300	12300
– титаномагнетитовая руда	-	430
№ 8-6 (2-й рудный скип без выгрузки):		
– агломерат	8176	8176
– кварцит	100	100
– окатыши Соколовские	5214	5214
– шлак конвертерный	920	920
№ 8-6 (2-й рудный скип с выгрузкой):		
– агломерат	8176	8176
– кварцит	100	100
– окатыши Соколовские	5214	5214
– шлак конвертерный	920	920

В результате использование в составе шихты доменной печи № 4 титаномагнетитовой руды в количестве 31,2 кг/т чугуна в течение 44 сут, обеспечивающей содержание  $TiO_2$  в шлаке 1,053 и  $Ti$  в чугуне 0,083%, сопровождалось снижением плотности теплового потока по внутренним виткам холодильников первого, второго и третьего рядов горна доменной печи № 4 соответственно с 4,11 до 3,74 (рисунок 4.11), 5,02 до 4,89 и 6,71 до 6,29 тыс. ккал/( $m^2 \cdot ч$ ).

В среднем для трех рядов холодильников горна доменной печи снижение величины плотности теплового потока по внутренним виткам холодильников составило 6,5% (см. таблицу 4.15).

Загрузка титаномагнетитовой руды в пристеночную зону доменной печи № 2 в течение 44 сут, обеспечивающей содержание  $Ti$  в чугуне и  $TiO_2$  в шлаке соответственно 0,099 и 1,16%, сопровождалось снижением плотности теплового потока по внутренним виткам холодильников первого, второго и третьего рядов горна соответственно с 3,12 до 2,47 (рисунок 4.11), 8,73 до 8,03 и 4,99 до 4,19 тыс. ккал/( $m^2 \cdot ч$ ).

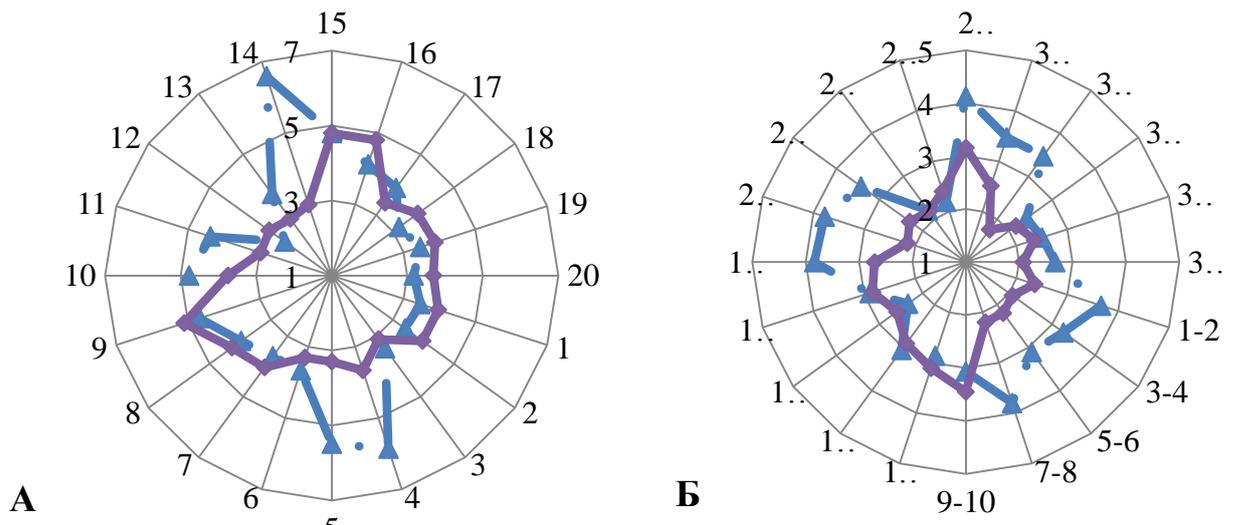


Рисунок 4.11 – Плотность теплового потока по внутренним виткам холодильников 1-го ряда горнов доменных печей № 4 (А) и 2 (Б), тыс. ккал/(м<sup>2</sup>·ч) в базовом периоде (—▲—), после загрузки титаномагнетитовой руды в течение 44 сут (—◆—)

В среднем для трех рядов холодильников горна доменной печи № 2 снижение величины плотности теплового потока по внутренним виткам холодильников составило 14,8% по отношению к базовому периоду (см. таблицу 4.16), что больше более чем в два раза по сравнению с доменной печью № 4, где не обеспечивали локальную загрузку титаномагнетитовой руды в пристеночную зону колошника.

#### 4.2.4 Воздействие на настыль доменных печей ПАО «ММК» разработанным режимом загрузки

Длительная работа доменных печей ПАО «ММК» с высокой долей агломерата в шихте сопровождается образованием настыли в шахте печи. Это приводит к повышению взаимного сопротивления потоков шихты и газа в верхней части печи, искажению распределения материалов и газа по радиусу колошника, периодическими подстоями и обрывами шихты, что снижает технико-экономические показатели ее работы.

В связи с этим разработали режим загрузки шихтовых материалов в колошниковое пространство печи для ускоренного истирания настыли за счет рационального формирования слоя шихты в колошниковом пространстве, обеспечивающий повышенную долю окатышей в пристеночной зоне. Опробовали разработанные режимы на доменной печи № 2 ПАО «ММК», работающей с настылью в различные промежутки времени – периоды I и II.

Для оценки толщины настыли в разных секторах печи использовали показания плотности тепловых потоков по внутренним и внешним виткам системы охлаждения, температур холодильников шахты, газодинамические показатели работы печи и результаты ультразвукового контроля. Наибольшую величину настыли по высоте печи в базовом периоде (период до применения разработанного режима) наблюдали в районе от 6-го ряда холодильников шахты до неохлаждаемой ее части (рисунки 4.12, 4.13).

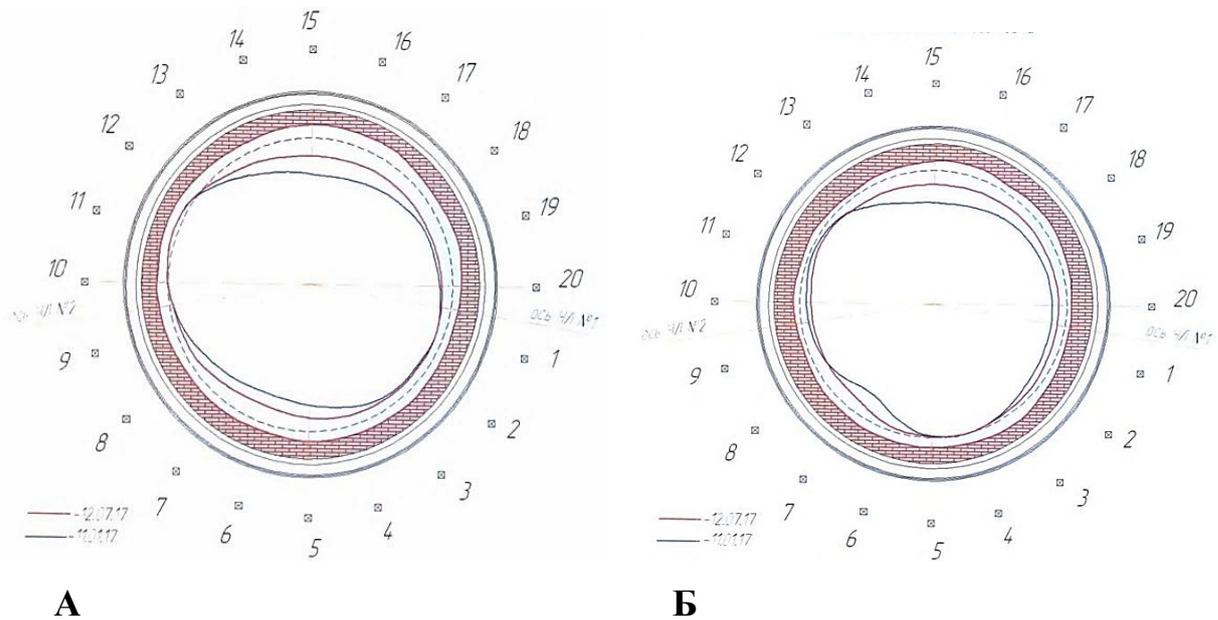


Рисунок 4.12 – Результаты ультразвукового обследования пояса шахты доменной печи № 2 в периоде II на отметке +26 (А); + 27,4 (Б), синяя линия и красная линия – соответственно до и после использования разработанного режима длительность 6 месяцев

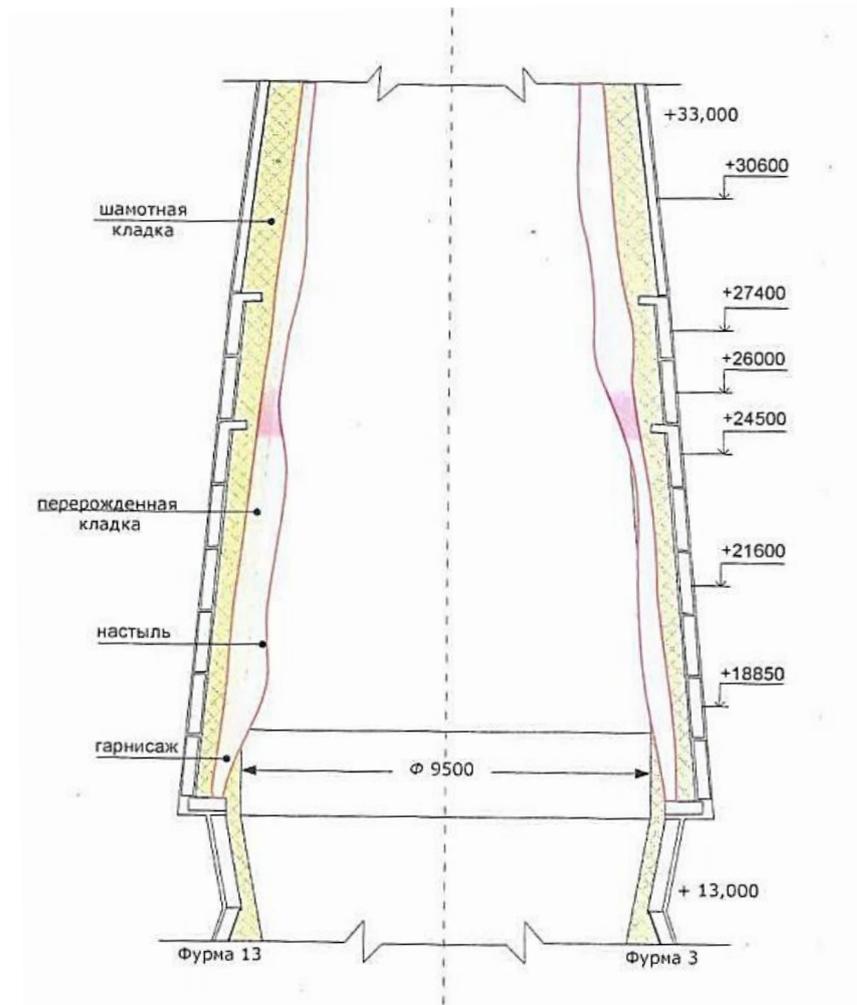


Рисунок 4.13 – Вертикальный разрез шахты по фурмам № 3-13 в периоде I

Длительность воздействия разработанного режима на футеровку доменной печи составляла 3-6 месяцев. Показатели работы доменной печи № 2 (таблица 4.20) приведены в период до использования разработанного режима (базовые) и по истечении трех месяцев в периоде I и шести месяцев в периоде II (контрольные).

Использование разработанного режима загрузки шихтовых материалов в колошниковое пространство печи в опытных периодах длительностью 3 месяца в периоде I и 6 месяцев в периоде II сопровождалось уменьшением толщины настыли (рисунки 4.14–4.17, таблица 4.21), что подтверждается ростом температур холодильников шахты, увеличением плотности теплового потока по внутренним виткам холодильников шахты (таблицы 4.22–4.23). В периоде I,

в контрольном периоде по сравнению с базовым, плотность теплового потока увеличилась от 1,081 до 2,991 ккал/(м<sup>2</sup>·ч).

Таблица 4.20 – Основные технологические показатели работы доменной печи № 2

Наименование показателей	Период			
	I		II	
	Базовый	Контрольный	Базовый	Контрольный
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна	506,0	457,1	452,2	445,8
Производительность, рассчитанная по фактическому количеству загруженных подач, т/сут	2536	3418	3117	3214
Доля окатышей от ЖРС, %	36	49,5 (опытный)	45	55 (опытный)
Рудная нагрузка, т/т	3,32	3,78	3,48	3,54
Содержание Fe в шихте, %	57,8	56,7	58,8	58,4
Расход:				
дутья, м <sup>3</sup> /мин	2711	3293	2806	2843
природного газа м <sup>3</sup> /т чугуна	84,2	93,4	112,2	117,0
Содержание кислорода, %	25,7	25,4	26,9	26,6
Температура дутья, °С	1130	1140	1131	1132

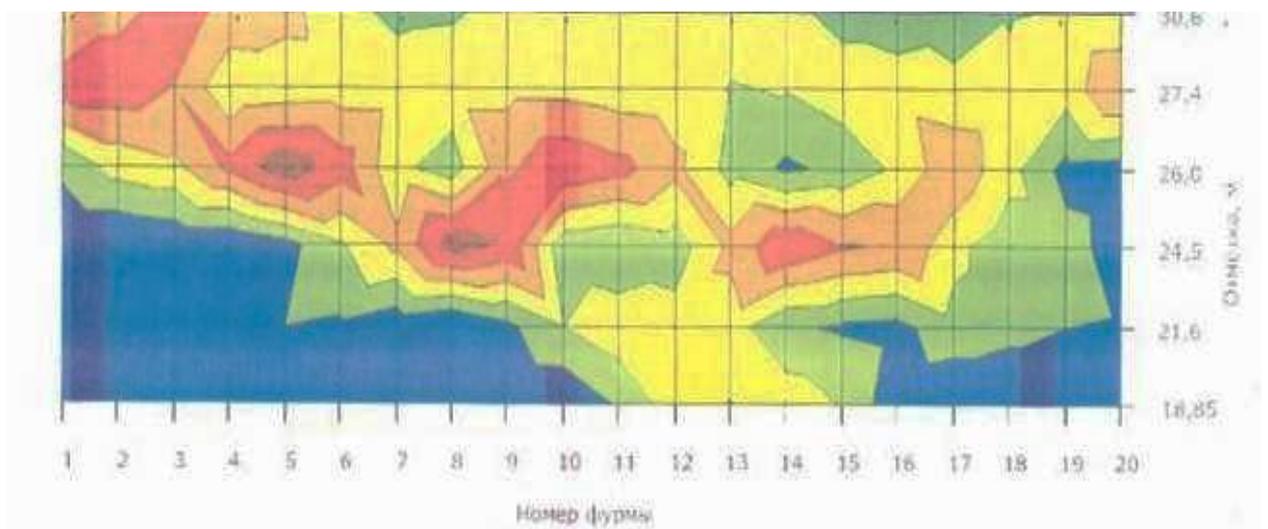


Рисунок 4.14 – Развертка внутренней поверхности огнеупорной кладки шахты доменной печи № 2 в базовом периоде I с нанесением толщины настылей, мм:

■ – 50-100; ■ – 100-250; ■ – 250-400; ■ – 400-550; ■ – 550-700;  
■ – 700-850

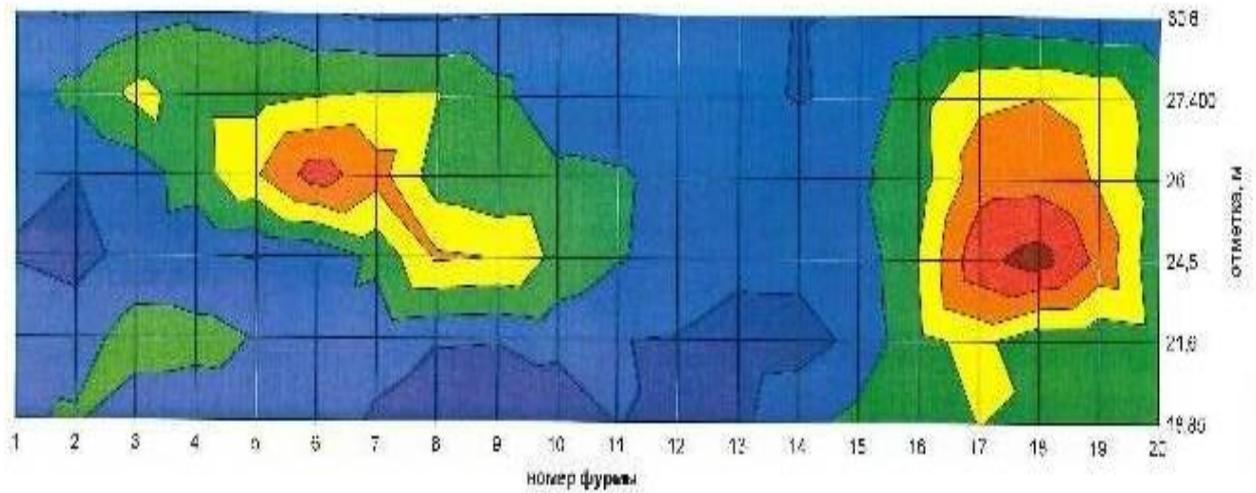


Рисунок 4.15 – Развертка внутренней поверхности огнеупорной кладки шахты доменной печи № 2 периоде I после шести месяцев использования разработанного режима загрузки компонентов шихты с нанесением толщины настывлей, мм: ■ – (-150-0); ■ – 0-150; ■ – 1 – 150-300; ■ – 300-450; ■ – 450-600; ■ – 600-750; ■ – 750-900

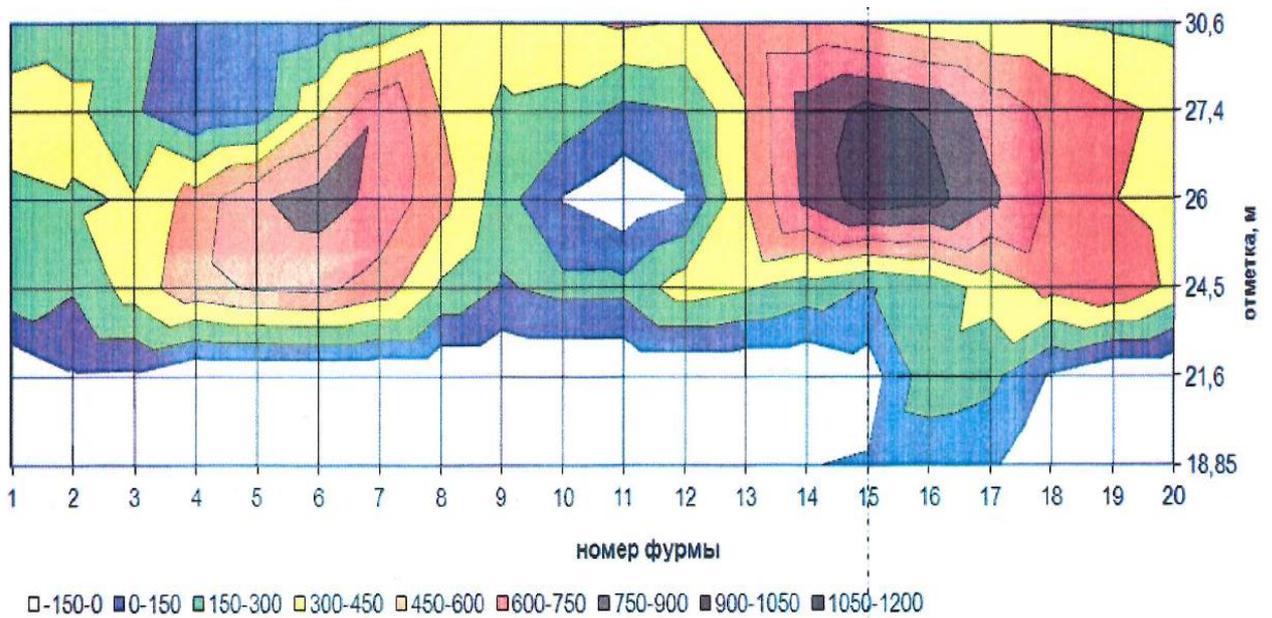


Рисунок 4.16 – Развертка внутренней поверхности огнеупорной кладки шахты доменной печи № 2 периоде II до использования разработанного режима загрузки компонентов шихты

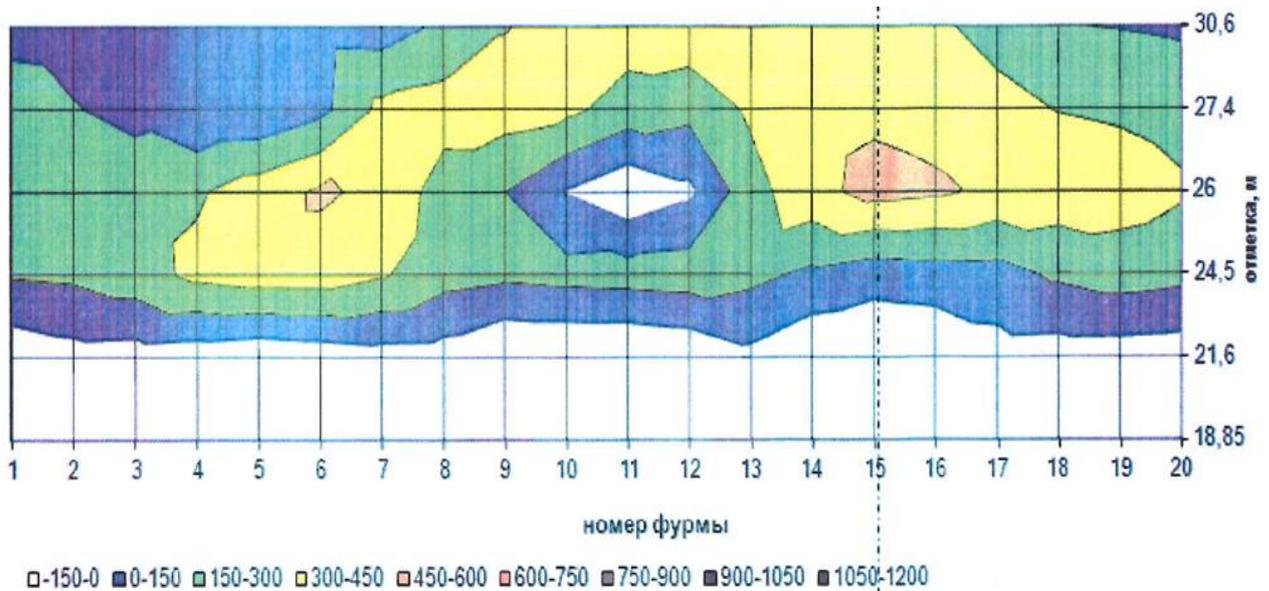


Рисунок 4.17 – Развертка внутренней поверхности огнеупорной кладки шахты доменной печи № 2 периоде II после шести месяцев использования разработанного режима загрузки компонентов шихты

Таблица 4.21 – Величина настыли в шахте доменной печи № 2 в исследуемые периоды

Высота замера настыли, м	Период I				Период II			
	Базовый		Контрольный		Базовый		Контрольный	
	Величина настыли, мм							
	среднее	макс	среднее	макс	среднее	макс	среднее	макс
18,85	79	430	100	303	5	50	0	0
21,60	128	360	110	342	22	240	0	0
24,50	241	720	221	812	352	635	208	373
26,00	316	760	258	674	485	985	289	501
27,40	320	590	209	449	430	940	256	419
30,60	225	520	37	122	290	485	220	440
<b>Среднее</b>	<b>218</b>	<b>563</b>	<b>156</b>	<b>450</b>	<b>264</b>	<b>556</b>	<b>162</b>	<b>289</b>

Таблица 4.22 – Температуры холодильников шахты в периоде II, °С

Номер ряда холодильников шахты	Температуры холодильников шахты, °С	
	Базовый	Контрольный
1	57	62
3	77	78
4	94	97
6	56	61
<b>Среднее</b>	<b>71</b>	<b>75</b>

Таблица 4.23 – Плотность теплового потока по внутренним виткам холодильников в периоде I, тыс. ккал/(м<sup>2</sup>·ч)

Номер ряда холодильников шахты	Плотность теплового потока по внутренним виткам холодильников, тыс. ккал/(м <sup>2</sup> ·ч) по периодам	
	Базовый	Контрольный
3	1,517	5,441
4	1,276	6,582
5	1,227	2,978
6	1,059	1,051
7	0,672	0,948
8	0,737	0,944
<b>Среднее</b>	<b>1,081</b>	<b>2,991</b>

Увеличение объема внутреннего пространства доменной печи после использования разработанного режима сопровождалось снижением взаимного сопротивления потоков шихты и газа, что обеспечило рост расхода дутья и природного газа. В периоде I повышение расхода газа составило 9,2 м<sup>3</sup>/т чугуна при повышении расхода дутья с 2711 до 3293 м<sup>3</sup>/мин (см. таблицу 4.20). Это обеспечило повышение технико-экономических показателей работы печи. Рост производительности составил 35% при понижении удельного расхода кокса более чем на 50 кг/т чугуна.

#### **4.3 Особенности технологии доменной плавки в условиях работы печи с настылью в верхней ее части**

При наличии настыли на футеровке шахты печи и невозможности или нецелесообразности ее устранения, так же как и в нормальных условиях ее работы, необходимо обеспечивать максимально возможные технико-экономические показатели работы печи. В связи с чем актуальной задачей для доменного производства является разработка рациональных режимов загрузки доменных печей для условий ее работы с настылью.

На доменной печи № 10 ПАО «ММК», оснащенной компактным БЗУ лоткового типа, работающей с верхней определяющей зоной по силовому взаимодействию потоков шихты и газа из-за наличия настыва на футеровке печи в районе от 4-го ряда холодильников шахты до неохлаждаемой ее части, исследовали факторным анализом признаки загрузки и дутья, определяющие эффективность и стабильность работы печи.

Оценили влияние параметров загрузки и дутья на газодинамические характеристики доменного процесса и технико-экономические показатели работы печи (таблица 4.24, 4.25) – производительность ( $Y_1$ ), рассчитанную по количеству загруженных подач и удельный расход кокса ( $Y_2$ ). Стабильность работы печи определялась степенью уравнивания опускающихся материалов подъёмной силой газового потока ( $Y_3$ ), коэффициентами сопротивления шихты в нижней ( $Y_4$ ) и верхней ( $Y_5$ ) частях печи, рассчитанных по формулам (4.1)–(4.3).

Степень уравнивания шихты потоком газа оценили по формуле

$$v = 10 \cdot h / \gamma, \quad (4.1)$$

где  $h$  – потери напора, кПа/м;  $h = \Delta P / H$ ;

$\gamma$  – насыпная плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;

$H$  – высота слоя шихты в печи, м;

$\Delta P$  – перепад давления газов, кПа.

Анализ таблицы 4.25 показывает, что не все учтенные в пассивном эксперименте признаки имеют необходимую вариацию (см. последний столбец таблицы 4.25) для того, чтобы выявить линейное влияние этих признаков на целевые отклики (характеристики последних приведены в первых пяти строках таблицы 4.25). При этом обращают на себя внимание входные признаки  $X_4$ ,  $X_{11}$ ,  $X_6$ ,  $X_8$ , имеющие значительные вариации соответственно 66,2; 55,3; 43,5; 23,7%, что позволяет выявлять их влияние на другие признаки, включая и отклики.

Таблица 4.24 – Условные обозначения суточных показателей работы доменной печи объемом 2014 м<sup>3</sup>

Признак	Наименование признака	Единица измерения
$Y_1$	Производительность печи	т/сут
$Y_2$	Расход кокса	кг/т чугуна
$Y_3$	Степень уравнивания	кПа·м <sup>2</sup> /кг
$Y_4$	Коэффициент сопротивления шихты движению газа в нижней части печи	-
$Y_5$	Коэффициент сопротивления шихты движению газа в верхней части печи	-
$X_1$	Расход природного газа	м <sup>3</sup> /ч
$X_2$	Расход дутья	м <sup>3</sup> /мин
$X_3$	Содержание кислорода в дутье	%
$X_4$	Расход водяного пара	г/м <sup>3</sup>
$X_5$	Температура дутья	°С
$X_6$	Уровень засыпи шихты	м
$X_7$	Содержание окатышей в ЖРС	%
$X_8$	Содержание ЖРС по станциям № 9-11	%
$X_9$	Содержание ЖРС по станциям № 6 – 8	%
$X_{10}$	Содержание ЖРС по станциям № 3 – 5	%
$X_{11}$	Содержание ЖРС по станциям № 1- 2	%
$X_{12}$	Эквивалентная по поверхности крупность ЖРС	мм
$X_{13}$	Средневзвешенная крупность ЖРС	мм
$X_{14}$	Однородность ЖРС по крупности	безразмерный
$X_{15}$	Горячая прочность окатышей по LTD(+6,3), %	%
$X_{16}$	Содержание в шихте FeO	%
$X_{17}$	Содержание в шихте MnO	%
$X_{18}$	Содержание в шихте Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%
$X_{19}$	Отношение CaO/SiO <sub>2</sub> в ЖРС	безразмерный
$X_{20}$	Интенсивность загрузки железорудного сырья	т/(м <sup>3</sup> ·сут)
$X_{21}$	Истираемость кокса по показателю M10	%
$X_{22}$	Холодная прочность кокса по M25	%
$X_{23}$	Реакционная способность кокса, CRI	%
$X_{24}$	Горячая прочность кокса, CSR	%

*Примечание. Все значения признаков, обозначенных в таблице 4.24 при использовании методов многомерной статистики будут определены в стандартизованном формате, а для наглядности числовые характеристики этих признаков в натуральном виде представлены в таблице 4.25.*

Таблица 4.25 – Описательная статистика ( $N=177$ ) измеряемых и расчетных признаков доменной печи объема 2014 м<sup>3</sup>

Признаки	Среднее	Доверительный интервал, %		Минимум	Максимум	Дисперсия	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации, %
		-95	+95					
$Y_1$	3703	3659	3747	2579,5	4398	89407	299,0	8,1
$Y_2$	472,3	470,4	474,2	436,94	524,48	167,5	12,94	2,7
$Y_3$	15,52	15,22	15,82	10,830	20,56	4,1	2,032	13,1
$Y_4$	9,71	9,61	9,81	8,085	12,01	0,5	0,678	7,0
$Y_5$	0,68	0,66	0,71	0,345	1,12	0,02	0,144	21,2
$X_1$	11220	11075	11365	7839,3	13500	949889	974,6	8,7
$X_2$	3084	3059	3108	2455,6	3501,1	27210	164,9	5,3
$X_3$	26,46	26,37	26,55	24,500	27,80	0,4	0,594	2,2
$X_4$	4,16	3,76	4,57	1,428	13,07	7,6	2,754	66,2
$X_5$	1050	1046	1054	915	1078	705,5	26,56	2,6
$X_6$	2,57	2,41	2,74	0,933	4,80	1,2	1,119	43,5
$X_7$	33,49	32,94	34,04	22,5	41,4	13,7	3,699	11,0
$X_8$	65,67	63,36	67,97	48,387	100,00	242,1	15,56	23,7
$X_9$	52,95	52,54	53,37	42,857	57,07	7,8	2,795	5,3
$X_{10}$	42,21	41,39	43,02	32,172	49,61	30,3	5,505	13,0
$X_{11}$	5,77	5,30	6,24	0,000	9,52	10,2	3,186	55,2
$X_{12}$	10,78	10,72	10,83	9,675	11,89	0,143	0,379	3,5
$X_{13}$	16,69	16,60	16,78	15,187	18,67	0,4	0,628	3,8
$X_{14}$	0,67	0,66	0,67	0,625	0,76	0,000	0,015	2,2
$X_{15}$	71,64	70,51	72,77	38,377	82,01	57,9	7,608	10,6
$X_{16}$	7,34	7,24	7,43	3,784	8,94	0,4	0,624	8,5
$X_{17}$	1,65	1,64	1,66	1,317	1,84	0,007	0,084	5,1
$X_{18}$	1,60	1,58	1,61	1,413	1,76	0,008	0,093	5,8
$X_{19}$	1,19	1,18	1,20	0,772	1,27	0,002	0,046	3,7
$X_{20}$	3,43	3,39	3,46	2,267	3,74	0,043	0,208	6,1
$X_{21}$	9,27	9,22	9,32	8,320	10,18	0,094	0,307	3,3
$X_{22}$	86,46	86,37	86,54	84,820	87,60	0,318	0,564	0,6
$X_{23}$	31,47	31,42	31,52	30,770	32,73	0,111	0,334	1,1
$X_{24}$	52,14	51,99	52,29	50,830	55,07	1,063	1,031	2,0

Матрица корреляции исследуемых входных и выходных признаков приведена в таблице 4.26. Целевое моделирование эффективности и стабильности доменного процесса предполагается возможным, так как согласно данным таблицы 4.26 обнаруживаются значимые связи между входными и

выходными признаками. Однако исходная матрица корреляции для входных признаков ( $X$ ) оказалась плохо обусловленной ( $\det X \rightarrow 0$ ) из-за наличия мультиколлинеарности, так как некоторые из 24 входных признаков имеют корреляцию между собой более 0,8 (по модулю).

Сильные взаимосвязи между входными признаками  $X_j$  и  $X_u$  целесообразным было определить как эффект их взаимодействия  $X_j \cdot X_u$ , то есть представить в массиве данных в качестве новых переменных. Такое нелинейное преобразование позволило не только устранить мультиколлинеарность, но и сохранить «связанные переменные» (см. табл. 4.25) определив их как  $X_1 \cdot X_2$ ,  $X_7 \cdot X_{16}$ ,  $X_7 \cdot X_{19}$ . При этом были исключены входные переменные ( $X_3$ ,  $X_{14}$ ,  $X_{22}$ ,  $X_{23}$ ,  $X_{24}$ ), которые слабо диспергируют (менее 3%) относительно среднего (см. последний столбец таблицы 4.25).

Коэффициент сопротивления шихты для нижней и верхней частей печи рассчитали по формулам (3.16), (3.17).

После исключения одних и формирования других признаков было целесообразным представить преобразованную корреляционную матрицу, содержащую 18 входных признаков (таблица 4.27), которая в дальнейшем положена в основу целевого моделирования на основе факторного (компонентного) анализа и регрессии на главных компонентах.

Моделирование с помощью уравнений регрессии охватывает многие стороны технологического процесса производства чугуна, при этом в статистических моделях, как правило, отражаются не более 3-5 входных переменных [70, 140]. К сожалению, в уравнения регрессии не представлялось возможным включить большое число исследуемых переменных из-за влияния мультиколлинеарности и слабой связи переменных с откликами. Кроме того, число включаемых регрессоров в модель не всегда способствовало содержательной интерпретации моделируемой зависимости.

Таблица 4.26 – Матрица корреляций факториальных (X) и результативных (Y) признаков

(уровень значимости  $\leq 0,05$  при  $|r_{ij}| > 0,15$ )

	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>14</sub>	X <sub>15</sub>	X <sub>16</sub>	X <sub>17</sub>	X <sub>18</sub>	X <sub>19</sub>	X <sub>20</sub>	X <sub>21</sub>	X <sub>22</sub>	X <sub>23</sub>	X <sub>24</sub>
Y <sub>1</sub>	1,00	-0,19	0,38	-0,01	-0,01	0,79	0,92	0,32	-0,30	0,59	-0,22	0,19	0,27	-0,08	-0,22	-0,07	-0,06	-0,18	0,17	-0,42	-0,20	0,08	0,04	0,04	0,69	-0,35	0,29	0,18	0,52
Y <sub>2</sub>	-0,19	1,00	-0,32	0,17	-0,11	-0,33	-0,20	-0,09	0,18	-0,03	0,25	0,27	-0,31	0,38	0,26	0,46	-0,00	-0,01	0,10	0,30	-0,37	-0,30	-0,27	-0,19	-0,04	-0,02	-0,19	-0,26	-0,28
Y <sub>3</sub>	0,38	-0,32	1,00	0,31	0,81	0,53	0,49	-0,09	-0,17	0,35	-0,81	0,15	0,63	-0,21	-0,77	-0,11	-0,08	-0,25	0,14	-0,42	-0,01	0,40	0,48	-0,21	0,14	0,00	-0,12	0,33	0,32
Y <sub>4</sub>	-0,01	0,17	0,31	1,00	0,35	0,01	-0,05	-0,25	0,03	0,06	-0,21	-0,05	0,23	-0,05	-0,24	0,26	-0,12	-0,02	-0,13	0,22	-0,07	0,09	0,10	0,01	0,02	0,08	-0,18	-0,05	-0,18
Y <sub>5</sub>	-0,01	-0,11	0,81	0,35	1,00	0,10	0,07	-0,26	-0,10	0,11	-0,82	0,16	0,46	0,02	-0,72	0,08	-0,01	-0,18	0,17	-0,23	-0,04	0,35	0,47	-0,31	-0,11	0,12	-0,30	0,14	0,07
X <sub>1</sub>	0,79	-0,33	0,53	0,01	0,10	1,00	0,84	0,29	-0,32	0,59	-0,40	0,25	0,52	-0,36	-0,39	-0,29	-0,06	-0,24	0,21	-0,56	-0,18	0,06	0,18	-0,07	0,50	-0,23	0,31	0,43	0,68
X <sub>2</sub>	0,92	-0,20	0,49	-0,05	0,07	0,84	1,00	0,14	-0,33	0,55	-0,33	0,24	0,41	-0,15	-0,30	-0,03	-0,02	-0,20	0,22	-0,48	-0,21	0,08	0,12	-0,07	0,64	-0,30	0,26	0,33	0,63
X <sub>3</sub>	0,32	-0,09	-0,09	-0,25	-0,26	0,29	0,14	1,00	-0,04	0,31	0,06	0,05	-0,03	-0,18	0,05	-0,33	-0,06	-0,11	0,07	-0,14	0,02	-0,07	-0,11	0,10	0,20	-0,20	0,28	-0,09	0,12
X <sub>4</sub>	-0,30	0,18	-0,17	0,03	-0,10	-0,32	-0,33	-0,04	1,00	-0,24	0,18	-0,08	-0,11	0,04	0,09	0,15	-0,07	0,06	-0,16	0,27	-0,10	-0,13	-0,08	0,10	-0,21	0,11	-0,20	-0,17	-0,30
X <sub>5</sub>	0,59	-0,03	0,35	0,06	0,11	0,59	0,55	0,31	-0,24	1,00	-0,35	0,21	0,28	-0,12	-0,28	-0,14	-0,02	-0,14	0,16	-0,35	-0,16	-0,03	0,15	-0,14	0,36	-0,13	0,07	0,14	0,29
X <sub>6</sub>	-0,22	0,25	-0,81	-0,21	-0,82	-0,40	-0,33	0,06	0,18	-0,35	1,00	-0,26	-0,74	0,36	0,79	0,16	0,03	0,28	-0,27	0,53	0,15	-0,19	-0,49	0,33	0,11	-0,10	0,16	-0,42	-0,36
X <sub>7</sub>	0,19	0,27	0,15	-0,05	0,16	0,25	0,24	0,05	-0,08	0,21	-0,26	1,00	0,20	-0,11	-0,16	-0,01	0,20	-0,28	0,77	-0,37	-0,84	-0,37	0,27	-0,82	-0,00	-0,16	0,12	0,17	0,34
X <sub>8</sub>	0,27	-0,31	0,63	0,23	0,46	0,52	0,41	-0,03	-0,11	0,28	-0,74	0,20	1,00	-0,63	-0,78	-0,05	-0,13	-0,32	0,19	-0,46	-0,21	0,08	0,35	-0,21	-0,10	0,08	0,01	0,65	0,62
X <sub>9</sub>	-0,08	0,38	-0,21	-0,05	0,02	-0,36	-0,15	-0,18	0,04	-0,12	0,36	-0,11	-0,63	1,00	0,16	0,57	0,03	0,18	-0,15	0,41	0,16	0,27	-0,20	0,04	0,22	-0,19	-0,06	-0,62	-0,44
X <sub>10</sub>	-0,22	0,26	-0,77	-0,24	-0,72	-0,39	-0,30	0,05	0,09	-0,28	0,79	-0,16	-0,78	0,16	1,00	0,01	0,11	0,29	-0,16	0,41	0,05	-0,42	-0,46	0,22	0,05	-0,01	0,08	-0,32	-0,33
X <sub>11</sub>	-0,07	0,46	-0,11	0,26	0,08	-0,29	-0,03	-0,33	0,15	-0,14	0,16	-0,01	-0,05	0,57	0,01	1,00	-0,09	0,02	-0,11	0,49	-0,16	-0,03	-0,27	-0,06	0,08	-0,07	-0,11	-0,16	-0,10
X <sub>12</sub>	-0,06	-0,00	-0,08	-0,12	-0,01	-0,06	-0,02	-0,06	-0,07	-0,02	0,03	0,20	-0,13	0,03	0,11	-0,09	1,00	0,76	0,42	-0,02	-0,15	-0,20	0,18	-0,23	0,01	-0,10	0,12	-0,11	-0,00
X <sub>13</sub>	-0,18	-0,01	-0,25	-0,02	-0,18	-0,24	-0,20	-0,11	0,06	-0,14	0,28	-0,28	-0,32	0,18	0,29	0,02	0,76	1,00	-0,26	0,25	0,22	-0,10	-0,07	0,18	-0,04	-0,07	0,09	-0,30	-0,23
X <sub>14</sub>	0,17	0,10	0,14	-0,13	0,17	0,21	0,22	0,07	-0,16	0,16	-0,27	0,77	0,19	-0,15	-0,16	-0,11	0,42	-0,26	1,00	-0,33	-0,62	-0,25	0,29	-0,65	0,07	-0,11	0,10	0,18	0,31
X <sub>15</sub>	-0,42	0,30	-0,42	0,22	-0,23	-0,56	-0,48	-0,14	0,27	-0,35	0,53	-0,37	-0,46	0,41	0,41	0,49	-0,02	0,25	-0,33	1,00	0,23	-0,09	-0,42	0,19	-0,12	0,06	-0,11	-0,36	-0,48
X <sub>16</sub>	-0,20	-0,37	-0,01	-0,07	-0,04	-0,18	-0,21	0,02	-0,10	-0,16	0,15	-0,84	-0,21	0,16	0,05	-0,16	-0,15	0,22	-0,62	0,23	1,00	0,54	-0,11	0,57	0,02	0,11	-0,08	-0,19	-0,33
X <sub>17</sub>	0,08	-0,30	0,40	0,09	0,35	0,06	0,08	-0,07	-0,13	-0,03	-0,19	-0,37	0,08	0,27	-0,42	-0,03	-0,20	-0,10	-0,25	-0,09	0,54	1,00	0,36	0,34	0,15	0,06	-0,17	-0,11	-0,13
X <sub>18</sub>	0,04	-0,27	0,48	0,10	0,47	0,18	0,12	-0,11	-0,08	0,15	-0,49	0,27	0,35	-0,20	-0,46	-0,27	0,18	-0,07	0,29	-0,42	-0,11	0,36	1,00	-0,17	-0,01	0,13	-0,13	0,15	0,06
X <sub>19</sub>	0,04	-0,19	-0,21	0,01	-0,31	-0,07	-0,07	0,10	0,10	-0,14	0,33	-0,82	-0,21	0,04	0,22	-0,06	-0,23	0,18	-0,65	0,19	0,57	0,34	-0,17	1,00	0,12	0,02	0,00	-0,15	-0,17
X <sub>20</sub>	0,69	-0,04	0,14	0,02	-0,11	0,50	0,64	0,20	-0,21	0,36	0,11	-0,00	-0,10	0,22	0,05	0,08	0,01	-0,04	0,07	-0,12	0,02	0,15	-0,01	0,12	1,00	-0,19	0,10	-0,03	0,13
X <sub>21</sub>	-0,35	-0,02	0,00	0,08	0,12	-0,23	-0,30	-0,20	0,11	-0,13	-0,10	-0,16	0,08	-0,19	-0,01	-0,07	-0,10	-0,07	-0,11	0,06	0,11	0,06	0,13	0,02	-0,19	1,00	-0,78	0,48	-0,37
X <sub>22</sub>	0,29	-0,19	-0,12	-0,18	-0,30	0,31	0,26	0,28	-0,20	0,07	0,16	0,12	0,01	-0,06	0,08	-0,11	0,12	0,09	0,10	-0,11	-0,08	-0,17	-0,13	0,00	0,10	-0,78	1,00	-0,27	0,43
X <sub>23</sub>	0,18	-0,26	0,33	-0,05	0,14	0,43	0,33	-0,09	-0,17	0,14	-0,42	0,17	0,65	-0,62	-0,32	-0,16	-0,11	-0,30	0,18	-0,36	-0,19	-0,11	0,15	-0,15	-0,03	0,48	-0,27	1,00	0,47
X <sub>24</sub>	0,52	-0,28	0,32	-0,18	0,07	0,68	0,63	0,12	-0,30	0,29	-0,36	0,34	0,62	-0,44	-0,33	-0,10	-0,00	-0,23	0,31	-0,48	-0,33	-0,13	0,06	-0,17	0,13	-0,37	0,43	0,47	1,00

Таблица 4.27 – Обновленная матрица корреляций факториальных (X) признаков для выполнения факторного анализа

(уровень значимости  $\leq 0,05$  при  $|r_{ij}| > 0,15$ )

	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>15</sub>	X <sub>17</sub>	X <sub>18</sub>	X <sub>19</sub>	X <sub>20</sub>	X <sub>21</sub>	X <sub>1</sub> ·X <sub>2</sub>	X <sub>7</sub> ·X <sub>16</sub>	X <sub>7</sub> ·X <sub>19</sub>
X <sub>4</sub>	1,00	-0,24	0,18	-0,11	0,04	0,09	0,15	-0,07	0,06	0,27	-0,13	-0,08	0,10	-0,21	0,11	-0,34	-0,25	-0,04
X <sub>5</sub>	-0,24	1,00	-0,35	0,28	-0,12	-0,28	-0,14	-0,02	-0,14	-0,35	-0,03	0,15	-0,14	0,36	-0,13	0,59	0,14	0,22
X <sub>6</sub>	0,18	-0,35	1,00	-0,74	0,36	0,79	0,16	0,03	0,28	0,53	-0,19	-0,49	0,33	0,11	-0,10	-0,40	-0,23	-0,20
X <sub>8</sub>	-0,11	0,28	-0,74	1,00	-0,63	-0,78	-0,05	-0,13	-0,32	-0,46	0,08	0,35	-0,21	-0,10	0,08	0,53	-0,05	0,15
X <sub>9</sub>	0,04	-0,12	0,36	-0,63	1,00	0,16	0,57	0,03	0,18	0,41	0,27	-0,20	0,04	0,22	-0,19	-0,32	0,15	-0,11
X <sub>10</sub>	0,09	-0,28	0,79	-0,78	0,16	1,00	0,01	0,11	0,29	0,41	-0,42	-0,46	0,22	0,05	-0,01	-0,38	-0,22	-0,12
X <sub>11</sub>	0,15	-0,14	0,16	-0,05	0,57	0,01	1,00	-0,09	0,02	0,49	-0,03	-0,27	-0,06	0,08	-0,07	-0,20	-0,30	-0,06
X <sub>12</sub>	-0,07	-0,02	0,03	-0,13	0,03	0,11	-0,09	1,00	0,76	-0,02	-0,20	0,18	-0,23	0,01	-0,10	-0,05	0,13	0,14
X <sub>13</sub>	0,06	-0,14	0,28	-0,32	0,18	0,29	0,02	0,76	1,00	0,25	-0,10	-0,07	0,18	-0,04	-0,07	-0,24	-0,11	-0,28
X <sub>15</sub>	0,27	-0,35	0,53	-0,46	0,41	0,41	0,49	-0,02	0,25	1,00	-0,09	-0,42	0,19	-0,12	0,06	-0,56	-0,34	-0,46
X <sub>17</sub>	-0,13	-0,03	-0,19	0,08	0,27	-0,42	-0,03	-0,20	-0,10	-0,09	1,00	0,36	0,34	0,15	0,06	0,06	0,28	-0,29
X <sub>18</sub>	-0,08	0,15	-0,49	0,35	-0,20	-0,46	-0,27	0,18	-0,07	-0,42	0,36	1,00	-0,17	-0,01	0,13	0,16	0,38	0,31
X <sub>19</sub>	0,10	-0,14	0,33	-0,21	0,04	0,22	-0,06	-0,23	0,18	0,19	0,34	-0,17	1,00	0,12	0,02	-0,08	-0,36	-0,48
X <sub>20</sub>	-0,21	0,36	0,11	-0,10	0,22	0,05	0,08	0,01	-0,04	-0,12	0,15	-0,01	0,12	1,00	-0,19	0,54	0,07	0,08
X <sub>21</sub>	0,11	-0,13	-0,10	0,08	-0,19	-0,01	-0,07	-0,10	-0,07	0,06	0,06	0,13	0,02	-0,19	1,00	-0,27	-0,14	-0,21
X <sub>1</sub> ·X <sub>2</sub>	-0,34	0,59	-0,40	0,53	-0,32	-0,38	-0,20	-0,05	-0,24	-0,56	0,06	0,16	-0,08	0,54	-0,27	1,00	0,09	0,32
X <sub>7</sub> ·X <sub>16</sub>	-0,25	0,14	-0,23	-0,05	0,15	-0,22	-0,30	0,13	-0,11	-0,34	0,28	0,38	-0,36	0,07	-0,14	0,09	1,00	0,35
X <sub>7</sub> ·X <sub>19</sub>	-0,04	0,22	-0,20	0,15	-0,11	-0,12	-0,06	0,14	-0,28	-0,46	-0,29	0,31	-0,48	0,08	-0,21	0,32	0,35	1,00

Для решения возникших проблем целесообразно было использование методов многомерной статистики, в частности факторного анализа [484], для выполнения ортогонализации пространства входных переменных и снижения его размерности. В этом случае представляется возможным не только выявить латентные переменные – факторы, но и построить регрессионные модели на главных компонентах, независимых друг от друга в силу их ортогональности.

### ***Факторизация входных признаков***

Число главных компонент (факторов) выбираем на основе величин собственных чисел корреляционной матрицы, график которых представлен на рисунке 4.18, где собственные числа  $\lambda$  расположены в последовательности убывания  $\lambda_1 = \lambda_{\max} > \lambda_2 > \dots > \lambda_N$ . Для исследователя представляют интерес только те значения  $\lambda_k$ ,  $k = \overline{1, m}$ , для которых  $\lambda_k \geq \lambda_m$ , исключая  $\lambda \leq 1$ , то есть целесообразно было отобрать для анализа собственные числа, представляющие значительный вес в общей их сумме  $\sum_{k=1}^N \lambda_k = N$ .

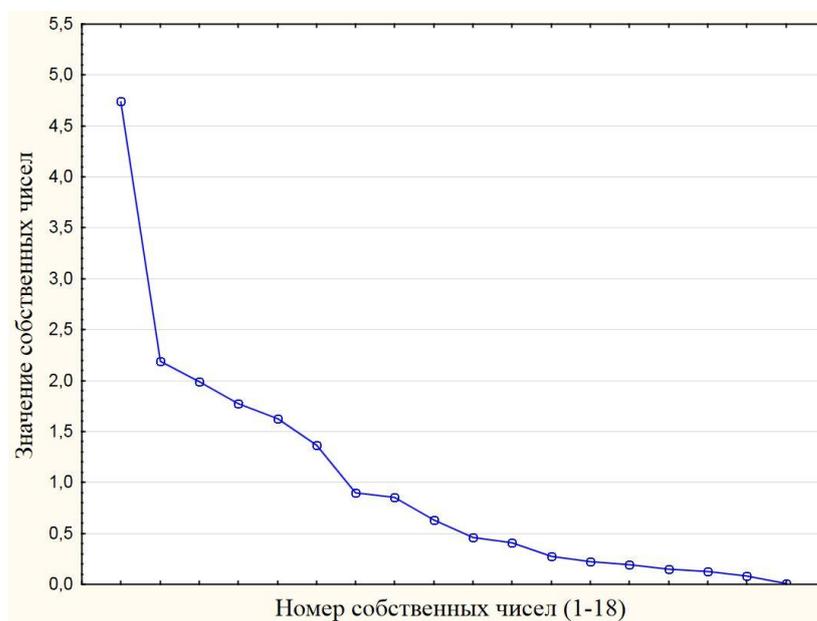


Рисунок 4.18 – К выбору количества собственных чисел для факторного анализа

Определять главные компоненты (факторы) имеет смысл до тех пор, пока каждый из них несет информации больше, чем любой из первичных

признаков, так как последние при условии их стандартизации объясняют лишь  $1/N$  часть общей дисперсии. При этом каждый фактор объясняет  $\lambda_k/N$  общей дисперсии учтенных признаков. Откуда следует, что целесообразно выделять те латентные переменные, для которых  $\lambda_k > 1$ , или общепринято, что

$$\sum_{k=1}^m \lambda_k > (0,7 \div 0,8)N.$$

Нами было выделено  $k=6$  латентных признаков, которые объясняют 76% дисперсии, содержащейся в учтенном 18-мерном массиве входных переменных. При этом размерность входного пространства была сокращена в 3 раза.

Латентные переменные (факторы) представляют собой ортогональную систему координат, определяемую на основе собственных векторов  $P_k$  матрицы  $R$  из однородной системы уравнений (матричной формы):  $(R - \lambda_k E) \cdot P_k = 0$ ,  $k = \overline{1, m}$ , где каждому  $\lambda_k$  соответствует  $P_k$ , причем векторы  $P_k$  ортогональны друг другу, так как матрица  $R$  действительных чисел симметрическая.

Столбцы  $W_k = \sqrt{\lambda_k} \cdot \tilde{P}_k$  ортогональной матрицы  $W = (w_{jk})$  соответствуют нормированным собственным векторам  $\tilde{P}_k = P_k / \sqrt{\sum_{j=1}^N P_{jk}^2}$ , где  $P_{jk}^2$  – квадрат  $j$ -координат  $P_k$  вектора.

Основная цель применения факторного анализа – снизить размерность  $N$ -мерного пространства учтенных признаков с минимальными потерями информации и выявить латентные переменные, чтобы продолжить моделирование признаков эффективности и стабильности работы доменной печи методом регрессионного анализа, собственно построения регрессии на главных компонентах.

Модель факторного анализа в матричной форме имеет вид  $Z = WF + L$ , где матрица  $Z = (z_{ji})$  содержит стандартизованные переменные,  $W = (w_{jk})$  –

матрица нагрузок стандартизованного  $F_k$  фактора на  $Z_j$ -признак,  $L$  – случайный вектор ошибок (специфика признаков  $Z$ ).

Таким образом, метод факторного анализа позволяет выразить наблюдаемые переменные  $Z_j, j = \overline{1, N}$  с помощью скрытых (не наблюдаемых) ортогональных переменных  $F_k, k = \overline{1, m}$  посредством весовых коэффициентов  $w_{jk}$ , которые в совокупности представляют собой матрицу ортогонального линейного преобразования  $W$ .

С помощью матрицы  $W$  решается не только прямая, но и обратная задача  $F = W^{-1} \cdot Z$  при условии существования обратной матрицы  $W^{-1}$ . Предполагая при этом, что  $W^T W = E$ , где  $E$  – единичная матрица, откуда  $W^T = W^{-1}$ , тогда  $F = W^T Z$ .

В нашем случае при  $m < N$  обращение матрицы  $W$  размера  $N \times m$  не представляется возможным, поэтому матрицу  $W^{-1}$  находят приближенно, методом наименьших квадратов (МНК) с заменой  $W^{-1} = B = (b_{kj})$ , где  $B$  – матрица нагрузок (коэффициентов регрессий) [484].

Поскольку модель для совокупности факторных откликов  $F$  будет совпадать с уравнением линейной регрессии  $F = BZ + \varepsilon$  или в развернутом

виде  $F_k = \sum_{j=1}^N b_{kj} Z_j + \varepsilon_k$ , где  $\varepsilon_k$  – ошибка аппроксимации  $k$ -уравнения,

минимизируемая методом наименьших квадратов. МНК-оценка матрицы  $B = (b_{kj}) = (W^T \cdot W)^{-1} \cdot W^T$ .

Программное обеспечение системы STATISTICA [485] позволяет вычислять автоматически матрицу  $B$  (коэффициентов факторных вкладов) и индивидуальные значения факторов  $f_{ik}, i = \overline{1, n}$  (факторных вкладов), что необходимо в дальнейшем для моделирования в ортогональном пространстве

признаков эффективности работы доменной печи, то есть построение регрессии на главных компонентах.

Ортогональное пространство факторов, которое обеспечивается ортогональным преобразованием  $W = (w_{jk})$ , не всегда оказывается пригодным для содержательной интерпретации факторов. В нашем случае существенно значимые нагрузки ( $w_{jk} \geq 0,7$ ) имеют не все факторы, при этом факторы имеют значимые или почти значимые нагрузки (таблица 4.28) и объясняют более 76% информационного пространства входных переменных.

Таблица 4.28 – Нагрузки на факторы до и после вращения ортогональной системы

Признак	Фактор											
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
	до вращения ортогональной системы						после вращения ортогональной системы					
$X_4$	0,32	-0,33	-0,21	-0,05	-0,20	0,08	0,05	-0,46	0,04	0,25	0,02	-0,16
$X_5$	-0,53	0,31	0,27	-0,25	0,09	0,16	-0,29	0,65	0,04	0,04	0,13	0,11
$X_6$	<b>0,82</b>	0,25	0,08	-0,17	0,08	-0,24	<b>0,86</b>	-0,07	-0,06	0,18	-0,16	-0,16
$X_8$	<b>-0,77</b>	-0,41	-0,05	-0,15	0,00	0,37	<b>-0,90</b>	0,09	0,13	0,19	0,07	0,21
$X_9$	0,49	0,34	0,44	0,44	-0,40	0,09	0,37	0,07	-0,05	-0,34	-0,07	<b>-0,80</b>
$X_{10}$	<b>0,74</b>	0,31	-0,14	-0,30	0,15	-0,34	<b>0,90</b>	-0,08	-0,11	0,24	0,00	0,09
$X_{11}$	0,37	-0,05	0,31	0,01	-0,59	0,54	-0,06	-0,04	0,04	0,27	0,05	<b>-0,89</b>
$X_{12}$	0,06	0,55	-0,54	0,29	0,27	0,43	0,02	0,04	<b>-0,94</b>	-0,08	0,21	0,04
$X_{13}$	0,42	0,35	-0,33	0,29	0,47	0,47	0,20	-0,05	<b>-0,92</b>	0,07	-0,21	-0,07
$X_{15}$	<b>0,78</b>	-0,15	0,09	0,05	-0,18	0,22	0,38	-0,36	-0,09	0,28	-0,24	-0,55
$X_{17}$	-0,18	-0,23	0,55	0,69	0,19	-0,08	-0,27	0,07	0,14	-0,64	-0,60	-0,18
$X_{18}$	-0,58	-0,02	-0,18	0,51	0,07	-0,06	-0,49	-0,04	-0,14	-0,57	0,09	0,23
$X_{19}$	0,36	-0,27	0,44	0,00	0,60	-0,07	0,24	0,06	0,06	0,11	<b>-0,82</b>	0,10
$X_{20}$	-0,12	0,50	0,62	-0,14	0,16	0,07	0,13	<b>0,79</b>	0,04	-0,06	-0,15	-0,15
$X_{21}$	0,04	-0,53	-0,22	0,13	0,10	-0,12	-0,16	-0,50	0,10	0,00	-0,21	0,20
$X_1 \cdot X_2$	-0,70	0,28	0,34	-0,36	0,20	0,15	-0,39	<b>0,80</b>	0,11	0,08	0,08	0,25
$X_7 \cdot X_{16}$	-0,39	0,41	-0,05	0,53	-0,19	-0,42	0,00	0,12	0,00	<b>-0,82</b>	0,34	0,08
$X_7 \cdot X_{19}$	-0,46	0,45	-0,27	-0,16	-0,44	-0,19	-0,07	0,23	0,09	-0,17	<b>0,79</b>	0,12
<b>Вариация</b>	4,74	2,19	1,99	1,77	1,62	1,37	3,35	2,40	1,84	1,92	2,07	2,11
<b>Доля вариации</b>	0,26	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,19	0,13	0,10	0,11	0,11	0,12

Для получения содержательной интерпретации подходящей была бы так называемая матрица «простой структуры»  $A = (a_{jk})$ , у которой столбцы имеют максимально возможное число нулевых или близких к нулю элементов, а некоторые из них  $a_{jk} \rightarrow 1$  (в идеальном случае).

В реальности можно лишь достичь структуры, «близкой к простой». В данной работе для выбора рационального факторного базиса в пространстве входных признаков использовали Varimax-метод ортогонального вращения стандартизованных факторов, при котором факторные нагрузки  $w_{jk}$  стремятся быть оптимально поляризованы между 0 и 1 на основе  $V(\varphi)$ -критерия поворота, приводящего к максимуму функцию:

$$V(\varphi) = \sum_{k=1}^m \left\{ N \sum_{j=1}^N (a_{jk}^2 / h_j^2)^2 - \left[ \sum_{j=1}^N (a_{jk}^2 / h_j^2) \right]^2 \right\},$$

где  $a_{jk}$  – текущая нагрузка  $k$ -фактора на  $j$ -признак;

$h_j^2$  – текущая общность  $j$ -признака,  $h_j^2 = \sum a_{jk}^2$ .

Критерий  $V(\varphi)$  максимизирует дисперсию факторных нагрузок, чтобы окончательно привязать к данному фактору  $F_k$  «изолированную группу», сильно связанных с этим фактором признаков, увеличивая  $w_{jk} > 0,6$  и, следовательно, уменьшая нагрузку слабых признаков, снижая  $w_{jk} < 0,4$ . Оптимум  $V(\varphi) \rightarrow \max$  достигается при очередном цикле ( $c = 1, 2, \dots$ ) попарного вращения координат факторов с остановом вращения при выполнении условия сходимости  $|V(\varphi)^{(c)} - V(\varphi)^{(c-1)}| \leq 10^{-6}$ .

Матрица нагрузок после оптимального поворота ортогональной системы координат Varimax-методом приведена в таблице 4.28. При этом следует обратить внимание, что информационная ценность факторного пространства после поворота остается неизменной (0,761). Изменяются лишь проекции

входных признаков на факторы в новом ортогональном факторном базисе, что способствует содержательной интерпретации выявленных латентных переменных (факторов).

После вращения ортогональной системы каждый фактор дополнительно получил по одному или более существенно значимых нагрузок исходных признаков от 0,79 до 0,94 (по модулю), названия факторов определили по содержанию в них указанных нагрузок исходных признаков.

Factor 1 – параметр загрузки ЖРС при станциях углового положения лотка №11-9 и 3-5 (от периферии к центру);

Factor 2 – интенсивность загрузки железорудного сырья, расходы дутья и природного газа;

Factor 3 – крупность ЖРС;

Factor 4 – доля окатышей в железорудном сырье;

Factor 5 – основность ЖРС;

Factor 6 – параметр загрузки ЖРС при станциях углового положения лотка №8-6 и кокса при станциях № 2-1 (от периферии к центру).

### **Регрессия на главных компонентах**

Основой для построения уравнений регрессии на главных компонентах является матрица корреляций откликов и факторов, представленная в таблице 4.29.

Модели целевых откликов с оценкой коэффициента детерминации  $R^2$ , ошибки уравнения и  $F$ -статистика Фишера в сравнении с табулированной статистикой на уровне значимости 0,05 для оценки адекватности модели приведены ниже:

$$Y_1 = 3703 - 52,5F_1 + 259,3F_2 + 34,2F_3 + 22,1F_6, \quad (4.2)$$

$$R^2 = 0,80; \quad \varepsilon = 134,8; \quad F(4,172) = 173,7 \gg F_{\text{табл}} = 2,42,$$

$$Y_2 = 472,3 + 3,41 F_1 + 2,44 F_4 + 4,44 F_5 - 5,48 F_6, \quad (4.3)$$

$$R^2 = 0,39; \xi = 10,2; F(4,172) = 27,8 > F_{\text{табл}} = 2,42,$$

$$Y_3 = 15,5 - 1,56F_1 + 0,5F_2 + 0,17F_3 - 0,5F_4, \quad (4.4)$$

$$R^2 = 0,72; \xi = 1,1; F(4,172) = 108,5 \gg F_{\text{табл}} = 2,42,$$

$$Y_4 = 9,71 - 0,21F_1 + 0,1F_4 - 0,15F_6, \quad (4.5)$$

$$R^2 = 0,16; \xi = 0,6; F(3,173) = 11,3 > F_{\text{табл}} = 2,65,$$

$$Y_5 = 0,68 - 0,103F_1 - 0,015F_2 - 0,05F_4 - 0,027F_6, \quad (4.6)$$

$$R^2 = 0,67; \xi = 0,08; F(4,172) = 89,9 > F_{\text{табл}} = 2,42.$$

Таблица 4.29 – Матрица корреляций откликов  $Y$  и факторов  $F$  для построения уравнения регрессии

	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$
$Y_1$	1,00	-0,19	0,38	-0,01	-0,01	-0,18	0,87	0,11	0,06	0,03	0,07
$Y_2$	-0,19	1,00	-0,32	0,17	-0,11	0,26	-0,10	0,05	0,16	0,34	-0,42
$Y_3$	0,38	-0,32	1,00	0,31	0,81	-0,77	0,25	0,08	-0,25	-0,03	0,03
$Y_4$	-0,01	0,17	0,31	1,00	0,35	-0,31	-0,05	0,03	0,14	-0,11	-0,22
$Y_5$	-0,01	-0,11	0,81	0,35	1,00	-0,71	-0,10	0,02	-0,35	0,07	-0,19
$F_1$	-0,18	0,26	-0,77	-0,31	-0,71	1	0	0	0	0	0
$F_2$	0,87	-0,10	0,25	-0,05	-0,10	0	1	0	0	0	0
$F_3$	0,11	0,05	0,08	0,03	0,02	0	0	1	0	0	0
$F_4$	0,06	0,16	-0,25	0,14	-0,35	0	0	0	1	0	0
$F_5$	0,03	0,34	-0,03	-0,11	0,07	0	0	0	0	1	0
$F_6$	0,07	-0,42	0,03	-0,22	-0,19	0	0	0	0	0	1

Регрессионный анализ представленных моделей (4.2)-(4.6) приведен в таблице 4.30, где наряду с коэффициентами регрессии  $b_j$  и их ошибками  $\xi(b_j)$  приведены аналогичные параметры для стандартизованных откликов  $\beta_j$  и  $\xi(\beta_j)$ . Модели для откликов  $Y_1$ - $Y_5$ , согласно  $F$ -статистике Фишера, адекватны, а их параметры, исходя из  $t$ -статистики Стьюдента, статистически значимы.

Сопоставляя (см. таблицу 4.30) параметры  $\beta_j$  (по модулю), можно определить силу влияния латентных факторов на соответствующие отклики, а

с учетом алгебраических знаков параметров и факторных нагрузок (см. таблицу 4.30), – направления этого влияния.

Таблица 4.30 – Регрессионный анализ моделей исследуемых откликов

Отклики	Факторы	Коэффициенты и их ошибки				Критерий Стьюдента $t(n-k-1)$	$p$ - уровень
		$\beta_j$	$\varepsilon(\beta_j)$	$b_j$	$\varepsilon(b_j)$		
$Y_1$	$F_0$	-	-	3703,0	10,1283	365,6053	0,00000
	$F_1$	-0,17573	0,03397	-52,5	10,1571	-5,1732	0,00000
	$F_2$	0,86725	0,03397	259,3	10,1571	25,5305	0,00000
	$F_3$	0,11437	0,03397	34,2	10,1571	3,3670	0,00094
	$F_6$	0,07379	0,03397	22,1	10,1571	2,1721	0,03121
$Y_2$	$F_0$	-	-	472,3	0,76684	615,9302	0,00000
	$F_1$	0,26323	0,05942	3,4	0,76901	4,4300	0,00002
	$F_4$	0,16276	0,05942	2,1	0,76901	2,7391	0,00681
	$F_5$	0,34284	0,05942	4,4	0,76901	5,7699	0,00000
	$F_6$	-0,42356	0,05942	-5,5	0,76901	-7,1284	0,00000
$Y_3$	$F_0$	-	-	15,52	0,08233	188,4800	0,00000
	$F_1$	-0,76622	0,04063	-1,56	0,08256	-18,8611	0,00000
	$F_2$	0,24617	0,04063	0,50	0,08256	6,0597	0,00000
	$F_3$	0,08361	0,04063	0,17	0,08256	2,0581	0,04109
	$F_4$	-0,24787	0,04063	-0,50	0,08256	-6,1013	0,00000
$Y_4$	$F_0$	-	-	9,71	0,04698	206,6401	0,00000
	$F_1$	-0,30539	0,06953	-0,21	0,04712	-4,3922	0,00002
	$F_4$	0,14416	0,06953	0,10	0,04712	2,0733	0,03963
	$F_6$	-0,22266	0,06953	-0,15	0,04712	-3,2023	0,00162
$Y_5$	$F_0$	-	-	0,68	0,00625	109,5458	0,00000
	$F_1$	-0,71348	0,04337	-0,10	0,00626	-16,4502	0,00000
	$F_2$	-0,10468	0,04337	-0,02	0,00626	-2,4136	0,01685
	$F_4$	-0,34800	0,04337	-0,05	0,00626	-8,0235	0,00000
	$F_6$	-0,18797	0,04337	-0,03	0,00626	-4,3339	0,00003

Рассмотрим на примере модели  $Y_1$  (производительности печи), где факторы по силе влияния распределились в последовательности  $F_2, F_1, F_3, F_6$ . При этом положительное влияние  $F_2$  (интенсивность по железорудному сырью, расходу дутья и природного газа) на  $Y_1$  обеспечивается положительными нагрузками на фактор  $F_2$  признаком  $X_{20}$  (интенсивность по железорудному сырью) и эффектом взаимодействия  $X_1 \cdot X_2$  (расход природного газа и дутья). Будем исходить из того, что геометрический смысл нагрузок  $\omega_{ij}$

– это проекция  $i$ -го признака (линейного или взаимодействия) на  $j$ -й фактор, то есть это коэффициент корреляции  $r_{ij}$  нормированных переменных  $X_i$  и  $F_j$ . Тогда очевидно, что более слабое по сравнению с  $F_2$  положительное влияние на отклик  $Y_1$  факторов  $F_3$  (крупность ЖРС) и  $F_6$  (загрузка ЖРС при станциях углового положения лотка №8-6 и кокса при станциях № 2-1) обеспечивается отрицательной корреляцией  $F_3$  с признаками  $X_{12}$  (эквивалентная по поверхности крупность ЖРС) и  $X_{13}$  (средневзвешенная крупность ЖРС) и отрицательной корреляцией  $F_6$  с признаками  $X_9$  (содержание ЖРС по станциям № 6-8) и  $X_{11}$  (содержание ЖРС по станциям № 1- 2). Фактор  $F_1$  (загрузка ЖРС при станциях углового положения лотка №11-9 и 3-5) для  $Y_1$  согласно таблице 4.28 интерпретируется неоднозначно, так как обеспечивается положительными нагрузками признаков  $X_6$  (уровень засыпи шихты),  $X_{10}$  (содержание ЖРС по станциям № 3-5) и отрицательной нагрузкой  $X_8$  (содержание ЖРС по станциям № 9-11).

Особо обратим внимание на интерпретацию влияния на факторы, содержащие нагрузки взаимодействующих признаков – это влияние  $X_1 \cdot X_2$  (расход природного газа и дутья) на фактор  $F_2$ ,  $X_7 \cdot X_{16}$  (содержание окатышей в ЖРС и содержание в шихте FeO) на фактор  $F_4$  и  $X_7 \cdot X_{19}$  (содержание окатышей в ЖРС и отношение CaO/SiO<sub>2</sub>) на фактор  $F_5$ . Влияние одного из признаков, входящего во взаимодействие, зависит от уровня, на котором находится другой признак, то есть положительное влияние определяется в случае совпадения направлений движения признаков относительно среднего значения, в противном случае – знак взаимодействия отрицательный, а если хотя бы один из признаков находится на среднем уровне, эффект взаимодействия обнуляется. Откуда следует, что в отличие от линейных эффектов, эффект взаимодействия входных признаков характеризуется их нелинейным влиянием на выходные (в нашем случае на факторы).

Аналогично интерпретируется воздействие факторов на последующие отклики  $Y_2$  (расход кокса),  $Y_3$  (степень уравнивания шихты) и коэффициенты сопротивления шихты в нижней  $Y_4$ , в верхней  $Y_5$  частях печи.

Качественная интерпретация факторов, характеризуемых непересекаемыми нагрузками на них входных признаков, способствует объяснению влияния факторов на отклики в соответствии со степенью их детерминации  $R^2$  и ошибок аппроксимации  $\varepsilon$ .

Исследуемые 6 факторов по разному воздействуют на 5 откликов и по количеству и по качеству. Так,  $F_1$  содержится во всех уравнениях регрессии,  $F_4$   $F_6$  – в четырех,  $F_2$  – в трех,  $F_3$  – в двух,  $F_5$  – только в одном; алгебраический знак и силы влияния факторов на отклики также различаются.

С учетом ортогональности факторного пространства, или, что то же в силу независимости факторов друг от друга, полученные модели удобно использовать для прогноза результатов по каждому отклику. Так, принимая во внимание, что факторы – стандартизованные переменные (со средним уровнем  $\bar{F}_j = 0$ ,  $j = \overline{1,6}$  и дисперсией  $\sigma^2(F_j) = \sigma(F_j) = 1$ ), следовательно, для всех  $\bar{F}_j = 0$ , входящих в конкретное уравнение отклика, получим точное его среднее значение. Если каждому фактору придавать конкретные отклонения относительно среднего, например  $\pm 1$ ,  $\pm 2$ ,  $\pm 3$  (кратные  $\sigma$ ), и принимая во внимание коэффициенты регрессии для соответствующих факторов, можно получить результат «улучшение» или «ухудшение» отклика с учетом известной для него ошибки. Например, для модели удельного расхода кокса  $Y_2$  факторы по силе влияния располагаются в последовательности  $F_6$ ,  $F_5$ ,  $F_1$ ,  $F_4$ , причем самый сильный из них  $F_6$  имеет отрицательное влияние. Следовательно, чтобы уменьшить значение отклика  $Y_2$ , нужно увеличить значение  $F_6$  относительно среднего и уменьшить относительно среднего значения  $F_5$ ,  $F_1$  и  $F_4$ . В данной задаче при соблюдении ее условий по отклонению относительно среднего на величину, равную двум единицам (в 95% доверительном интервале), получим  $Y_2 = 472,3 - 3,41 \cdot 2 - 2,44 \cdot 2 - 4,44 \cdot 2 - 5,48 \cdot 2 = 440,8 \pm 10,2$ . Эти данные подтверждены выборочной статистикой для соответствующих вариаций входных признаков, определяющих тот или иной фактор. Таким образом,

расчеты показывают, что даже в условиях работы печи с настылью предельно можно снизить удельный расход кокса на 6,6% для допустимых условий вариации входных признаков. Однако для принятых условий вариаций по фактору  $F_1$  (загрузка ЖРС при станциях углового положения лотка №11-9 и 3-5 (от периферии к центру) необходима коррекция по направлению его действия, чтобы снизить сопротивление шихты в верхней части печи ( $Y_5$ ), так как это необходимо для обеспечения ровности схода материалов в верхней части шахты и работы печи без подвисаний в определяющей по газодинамике зоне. Такое изменение фактора  $F_1$  при прочих равных условиях повышало удельный расход кокса  $Y_2$  и уменьшало производительность печи  $Y_1$ . Например, снижение степени уравнивания шихты на 13,3% уменьшением  $F_1$  на величину  $\sigma$  (за счет признаков  $X_6$ ,  $X_8$  и  $X_{10}$ ) сопровождалось ростом удельного расхода кокса на 3,41 кг/т чугуна и уменьшением производительности на 52,5 т/сут.

В условиях рассмотренных выше значений набора факторов  $F_1=1$ ,  $F_2=1$ ,  $F_3=1$ ,  $F_4=-1$ ,  $F_5=-1$ ,  $F_6=1$ , отклики принимают значения  $Y_1= 3966$  (отклонение от  $\bar{Y}_1$  на 7,1%);  $Y_2= 463,3$  (отклонение от  $\bar{Y}_2$  на -1,9%);  $Y_3=-15,11$  (отклонение от  $\bar{Y}_3$  на -2,52%);  $Y_4= 9,25$  (отклонение от  $\bar{Y}_4$  на -4,74%);  $Y_5=0,585$  (отклонение от  $\bar{Y}_5$  на -13,97%).

Полученные выше решения для факторного плана  $F(1,1,1,-1,-1,1)$  являются допустимыми в условиях работы доменной печи с настылью и не противоречат ограничениям наблюдаемых диапазонов варьирования входных и выходных переменных.

В завершение интерпретации еще раз обратим внимание на факторы загрузки шихты ( $F_1$  и  $F_6$ ), которые имеют самый большой «успех» в объяснении вариации для всех исследуемых откликов.

Из анализа зависимостей 4-8 следует, что при работе печи с настылью в шахте уменьшение рудной нагрузки на периферии  $F_1$  при повышении ее величины в рудном гребне и в промежуточной зоне в условиях раскрытия

центральной части за счет роста доли кокса, поступающего в колошниковое пространство со станций углового положения лотка № 1, 2, сопровождалось снижением степени уравнивания шихты подъемной силой газового потока  $Y_3$ , уменьшением коэффициента сопротивления шихты движению газа в верхней части печи  $Y_5$ . Это приводит к перерасходу удельного расхода кокса  $Y_2$  и уменьшению производительности печи  $Y_1$ . При этом снижение газодинамической напряженности в верхней части печи позволяло работать печи без подвисаний в верхней ее части. Положительное влияние на газодинамику оказывало повышение эквивалентной по поверхности крупности железорудного сырья с 9,7 до 11,9 мм, снижение доли окатышей с 40 до 30%, уменьшение содержания железорудного материала в шихте периферийной зоны (соответствующей станциям лотка загрузочного устройства № 9-11) от 100 до 67% за счет увеличения его в рудном гребне с 48 до 51% и промежуточной зоне с 37 до 39% [486].

#### **Выводы по главе 4**

1. Выявлены закономерности распределения материалов и газов по радиусу колошника при различных режимах загрузки компонентов шихты в бункер компактного бесконусного загрузочного устройства лоткового типа. Разработаны и обоснованы рациональные параметры режимов загрузки шихтовых материалов в колошниковое пространство, обеспечивающие сохранение текущих тепловых нагрузок на системы охлаждения печей при разгаре футеровки или возникновении риска ее ускоренного истирания, удаления настыва в шахте печи. Рациональные режимы загрузки шихтовых материалов обеспечивают отдаление части окатышей от футеровки, что снижает тепловые нагрузки на систему охлаждения шахты, распара и заплечиков печей или увеличение их содержания в пристеночной зоне для ускоренного истирания настыва.

Загрузка титаномагнетитовой руды в пристеночную зону колошника для уменьшения тепловых нагрузок горна печи.

2. Установлено, что минимальному поступлению окатышей в периферийную часть соответствует загрузка их в шихтовый бункер БЗУ после агломерата, открытие затвора бункера для выгрузки материалов в колошниковое пространство при вращении лотка по окружности с одновременным изменением его углового положения относительно вертикали от периферии до позиции, соответствующей  $2/3$  радиуса колошника.

3. Установлено, что максимальному поступлению окатышей в пристеночную зону колошника соответствует загрузка их в нижнюю часть бункера БЗУ, открытие затвора бункера для выгрузки материалов в колошниковое пространство при вращении лотка по окружности в направлении его движения от периферии к центру. Рост содержания окатышей на 1% в интервале их содержания 30-60% от железорудной части шихты сопровождался повышением температуры холодильников шахты в среднем на  $1,1^{\circ}\text{C}$ . При использовании такого режима в течение 3-6 месяцев с долей окатышей выше 38% на печах без настыли сопровождалось нарушением в службе холодильников шахты, распара и заплечиков. Параметры режима загрузки – матрица, размер рудной колоши и уровень засыпи – влияли через температуру холодильников. Уменьшению средней температуры холодильников на  $1^{\circ}\text{C}$  способствовало снижение рудной нагрузки в периферийной зоне печи на 0,91%.

4. Промышленные опробования специальных режимов загрузки для сохранения стойкости холодильников футеровки проведены на доменных печах № 2, 4, 6, 9. Переход на разработанный рациональный режим загрузки на доменной печи № 4, при одновременном увеличении доли окатышей в шихте от 38 до 45%, предотвратил возможное увеличение температуры холодильников шахты, распара и заплечиков на  $7,7^{\circ}\text{C}$ . Такой режим при постоянной доле окатышей, равной 35%, снизил среднюю температуру

холодильников шахты доменной печи № 9 на  $3,4^{\circ}\text{C}$ . Рациональный температурный интервал для этих печей находился в интервале  $40-50^{\circ}\text{C}$ .

5. Проведением физического моделирования и промышленными исследованиями на доменных печах № 2 и 4 ПАО «ММК» разработан рациональный режим загрузки материалов, формирующих гарнисаж в горне печи, обеспечивающий эффективное уменьшение тепловых нагрузок на холодильники в нижней части доменных печей, оснащенных компактным БЗУ лоткового типа. Загрузка титаномагнетитовой руды в нижнюю часть бункера БЗУ и выпуск его содержимого в пристеночную зону печи № 2 ПАО «ММК» в течение 44 сут в количестве, обеспечивающем прирост содержания  $\text{TiO}_2$  в шлаке на  $0,32\%$ , а  $\text{Ti}$  в чугуна на  $0,020\%$  при конечном их содержании в продуктах плавки соответственно  $1,16$  и  $0,099\%$ , сопровождалось снижением величины плотности теплового потока по внутренним виткам холодильников на  $14,8\%$  по отношению к базовому периоду. Отдаление титансодержащего материала от пристеночной зоны печи, размещением его в слое железорудного сырья в бункере БЗУ сопровождалось менее эффективным снижением плотности теплового потока.

6. Промышленные опробования специальных режимов загрузки для ускоренного истирания настывли проведены на доменной печи № 2. Работа печи на разработанном рациональном режиме загрузки с доведением доли окатышей до  $50-55\%$  в течение 6 месяцев сопровождалось удалением настывли, плотность теплового потока по внутренним виткам холодильников шахты выросла с  $1,081$  до  $2,991$  ккал/( $\text{m}^2 \cdot \text{ч}$ ), что обеспечило рост производительности печи на  $18,9\%$  и снижение удельного расхода кокса на  $5,8\%$ .

7. Разработан проект изменения в технологическую инструкцию ТИ 101-Д-22-2014. Применительно к доменным печам № 2, 4, 6, 9 и 10 внедрена технология доменной плавки, обеспечивающая в условиях роста доли окатышей сохранение величины тепловых нагрузок на систему охлаждения

шахты, распара и заплечиков на рациональном уровне в пределах 40-50<sup>0</sup>С. Данная технология удостоена серебряной медалью лауреата Международной промышленной выставки «МЕТАЛЛ-ЭКСПО» в 2017 году.

8. Факторным анализом признаков загрузки и дутья установлено, что в условиях работы печи с настылью в шахте, положительное действие на газодинамику процесса и, следовательно, стабильный сход шихтовых материалов без подвисаний в лимитирующей зоне по силовому взаимодействию потоков шихты и газа, оказывает повышение эквивалентной по поверхности крупности железорудного сырья с 9,7 до 11,9 мм, а также уменьшение содержания железорудного материала в шихте периферийной зоны (соответствующей станциям лотка загрузочного устройства № 9-11) от 100 до 67% за счет увеличения его в рудном гребне с 48 до 51% и промежуточной зоне с 37 до 39%. Устойчивость работы доменной печи при наличии настыли в шахте обеспечивали снижением степени уравнивания опускающихся материалов подъёмной силой газового потока и коэффициентов сопротивления шихты в нижней и верхней частях печи соответственно на 5,16, 9,47 и 27,94% относительно своих средних эксплуатационных уровней.

## **Глава 5 РАЗРАБОТКА ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ ПРИ РАБОТЕ ПЕЧИ С ВЕРХНЕЙ ЛИМИТИРУЮЩЕЙ ПО ГАЗОДИНАМИКЕ ЗОНОЙ**

Как известно, в современных условиях интенсивность противоточного движения шихты и газов в доменных печах ограничивается одной из двух лимитирующих зон, первая из которых по ходу движения материалов располагается в верхней части шахты (2-6 м от уровня засыпи), другая – в области заплечиков над фурменными очагами. Они характеризуются пониженной газопроницаемостью шихты и (или) повышенной подъемной силой газового потока, что сдерживает дальнейшее улучшение показателей доменной плавки. В связи с этим разработали мероприятия, совместное использование которых позволит повысить эффективность доменной плавки в условиях работы печей с верхней и нижней лимитирующей по газодинамике зоной.

### **5.1 Исследование физико-механических и физико-химических свойств кокса разных фракций**

#### **5.1.1 Ситовый состав и структурная прочность**

Ситовый состав исследуемого кокса, отобранного в ПАО «ММК» по ГОСТ 5954-91, соответствовал таблице 5.1. Коксовый орешек различали следующих видов: выделенный из вновь испеченного кокса или отсеянный у печи, сухого или мокрого тушения, ситовый состав которого приведен в таблице 5.2.

Согласно таблице 5.2 коксовый орешек содержал более 50% фракции 13-19 мм. Это соответствовало крупности агломерата и окатышей, поэтому использование орешка может способствовать увеличению порозности,

вследствие чего улучшению газопроницаемости шихты в верхней части печи. Орешек, выделенный из вновь испеченного кокса, содержал на 20% больше фракции 19-25 мм по сравнению с полученным путем отсева у доменной печи. Структурную прочность коксового орешка определили по ГОСТ 9521-74. Результаты приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.1 – Ситовый состав исследуемого кокса

Вид кокса	Содержание, %, по классам крупности, мм				
	+ 80	60-80	40-60	25-40	0-25
Сухого тушения	11,1	38,9	40,1	8,7	1,2
Мокрого тушения	9,4	40,8	38,7	8,7	2,4

Таблица 5.2 – Ситовый состав исследуемого коксового орешка

Вид коксового орешка	Содержание, %, по классам крупности, мм			
	22,4-25	19-22,4	13-19	10-13
Отсеянный из вновь испеченного кокса:				
– сухого тушения	30,9	42,1	22,2	4,8
– мокрого тушения	29,7	40,6	23,9	5,8
Отсеянный у доменной печи:				
– сухого тушения	25,3	30,7	34,8	9,2
– мокрого тушения	22,1	26,4	38,7	12,8

Таблица 5.3 – Структурная прочность кокса по фракциям, %

Фракция, мм	Виды кокса			
	Вновь испеченный		Отсеянный у доменной печи	
	сухого тушения	мокрого тушения	сухого тушения	мокрого тушения
+ 80	77,5	75,8	–	–
60-80	79,7	77,6	–	–
40-60	80,5	78,9	–	–
25-40	86,9	86,1	87,0	86,6
10-25	86,2	85,5	86,7	85,8

Приведенные данные (см. таблицу 5.3) подтверждают ранее полученные результаты [487]. Самой прочной являлась фракция 25-40 мм. Несколько уступал ей в прочности класс 10-25 мм. Структурная прочность кокса сухого тушения выше, чем кокса мокрого тушения. Средневзвешенные величины

структурной прочности металлургического кокса сухого и мокрого тушения составили 80,4 и 78,7% соответственно. Средневзвешенная структурная прочность скипового кокса сухого тушения составила 79,8%, мокрого – 78%, то есть она была меньше прочности орешка, величина которого соответственно составляла 86,2 и 85,5%. Таким образом, коксовый орешек имел существенно более высокую структурную прочность.

### 5.1.2 Холодная механическая прочность

Для определения холодной механической прочности использовали ГОСТ 5953-93. Коксовый орешек имел размеры 10-25 мм, поэтому оценили только его истираемость ( $M_{10}$ ). Полученные данные представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Холодная прочность кокса и коксового орешка, определенная в производственных условиях, %

Показатель	Кокс		Коксовый орешек	
	сухого тушения	мокрого тушения	сухого тушения	мокрого тушения
$M_{10}$	8,8	9,9	6,8	9
$M_{25}$	86,7	84,1	–	–

Истираемость коксового орешка относительно кокса была меньше, потому что в коксе присутствовало до 15-20 % класса более 80 мм, имеющего минимальную структурную прочность.

Холодную прочность коксового орешка оценили в галтовочном барабане, используемом при определении горячей прочности CSR. Установка была предоставлена лабораторией коксохимического производства ПАО «ММК».

Для оценки холодной прочности в галтовочном барабане отбирали пробу исследуемого материала крупностью 19-22,4 мм, массой 0,2 кг. Ее помещали в барабан, который приводили во вращение с частотой 20 об/мин. Испытание длилось 30 мин, затем в течение 10 мин отсеивали на вибрационном грохоте

(ситане) материал крупностью менее 9,5 мм. Надрешетный продукт взвешивали и определяли его количество в процентном соотношении от загруженной массы. Полученный результат представлен в таблице 5.5 показателем  $M_{>9,5}$ . Для оценки стабильности этого показателя при последующих разрушениях оставшуюся массу коксового орешка снова поместили в галтовочный барабан и подвергли его аналогичному испытанию. Полученный результат представлен в табл. 5.5.

Таблица 5.5 – Показатель холодной прочности коксового орешка, определенный в галтовочном барабане впервые  $M_{>9,5}$  и повторно  $M_{>9,5}(п)$ , %

Вид коксового орешка			
Вновь испеченный		Отсеянный у доменной печи	
сухого тушения	мокрого тушения	сухого тушения	мокрого тушения
83,8	80,1	84,6	80,8
90,5	89,9	91,8	90,4

Согласно таблице 5.5 коксовый орешек сухого тушения имел более высокую холодную прочность по сравнению с орешком мокрого тушения. Вновь испеченный коксовый орешек больше подвержен истираемости по сравнению с классом 10-25 мм, выделенным из отсева на доменных печах [488].

Коксовый орешек, испытанный в галтовочном барабане повторно, обладал меньшей истираемостью.

### 5.1.3 Горячая прочность и реакционная способность

Реакционную способность кокса CRI и горячую прочность CSR определяли по ГОСТ Р50921-2005 на установке фирмы ЛЕКО, представленной на рисунках 5.1, 5.2.

Кроме этого, в соответствии с ГОСТ 10089-89 определяли константу скорости реакции углерода кокса с газом  $CO_2$  (показатель РСК). В таблицах 5.6, 5.7 приведены результаты исследований горячей прочности и реакционной способности коксового орешка различного вида.

Кокс фракции 25-40 мм имел минимальную CRI и максимальную CSR, а класс 10-25 мм, наоборот, минимальную CSR и максимальную CRI. В металлургическом коксе сухого тушения значения CSR и CRI составили 58,4 и 30% соответственно. В коксе мокрого тушения горячая прочность была несколько меньше (56,2%), реакционная способность выше (31,5%) [489].



Рисунок 5.1 – Шкаф управления и вертикальная печь для определения реакционной способности по CRI

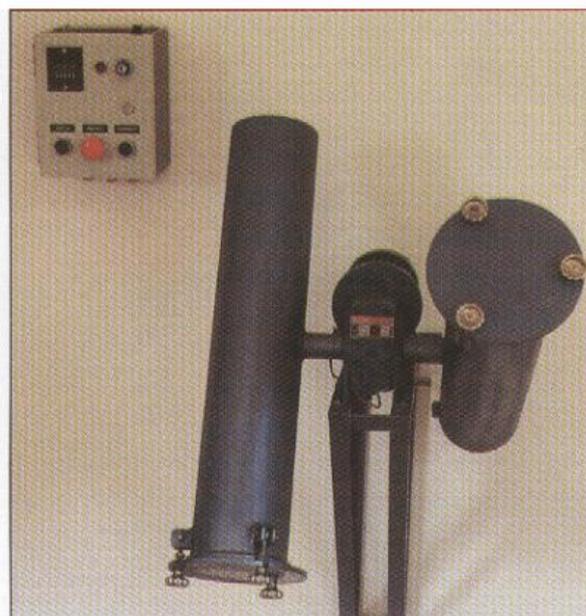


Рисунок 5.2 – Двойной барабан для измерения прочности после реакции

Таблица 5.6 – Реакционная способность и горячая прочность кокса  
и коксового орешка, %

Вид кокса	Параметры		
	CRI, %	CSR, %	РСК, см <sup>3</sup> /Г·с
Металлургический: – сухого тушения	30,0	58,4	0,26
– мокрого тушения	31,5	56,2	0,35
Коксовый орешек: вновь испеченный:			
– сухого тушения	31,2	55,9	0,31
– мокрого тушения	32,3	54,8	0,39
отсеянный у доменной печи:			
– сухого тушения	31,0	56,4	0,30
– мокрого тушения	32,1	55,1	0,38

Таблица 5.7 – Реакционная способность и горячая прочность кокса  
по фракциям

Параметры	Фракция, мм				
	+ 80	60-80	40-60	25-40	10-25
Кокс сухого тушения: CRI, %	30,3	30,0	29,5	29	30,7
CSR, %	57,9	58,4	59,5	60,7	56,9
РСК, см <sup>3</sup> / Г·с	0,27	0,26	0,24	0,22	0,29
Кокс мокрого тушения: CRI, %	31,7	31,5	31,1	30,5	32,1
CSR, %	55,9	56,2	57	58,2	55,1
РСК, см <sup>3</sup> / Г·с	0,36	0,35	0,33	0,30	0,38
Кокс сухого тушения, отсеянный у доменной печи № 1: CRI, %	–	–	–	29,3	31,0
CSR, %	–	–	–	60,1	56,4
РСК, см <sup>3</sup> / Г·с	–	–	–	0,23	0,30
Кокс мокрого тушения, отсеянный у доменной печи № 4: CRI, %	–	–	–	30,7	31,9
CSR, %	–	–	–	57,8	55,5
РСК, см <sup>3</sup> /Г·с	–	–	–	0,31	0,37

В доменной плавке коксовый орешек загружали в рудный гребень. Высокое содержание CO<sub>2</sub> в газе из этой зоны позволяло израсходовать его до прихода в горн печи. Вследствие низкой горячей прочности и небольших размеров орешка поступление его в горн печи нежелательно, поскольку это приводило к замусориванию его мелочью.

### 5.1.4 Технический анализ

Влажность кокса определяли по ГОСТ 27588-91, зольность – по ГОСТ11022-95, содержание летучих – по ГОСТ 6382-2001, серы – по ГОСТ 8606-93. Результаты приведены в таблицах 5.8, 5.9.

Таблица 5.8 – Технический анализ кокса и коксового орешка, %

Вид кокса	Параметры				
	$A^d$	$V^{daf}$	$W_r$	C	S
Металлургический:					
– сухого тушения	11,8	1,3	0,2	83,85	0,59
– мокрого тушения	12,9	1,4	9,2	83,21	0,60
Коксовый орешек вновь испеченный:					
– сухого тушения	13,1	1,5	0,3	83,18	0,55
– мокрого тушения	13,7	1,7	16,4	82,88	0,60
отсеянный у доменной печи:					
– сухого тушения	13,0	1,6	0,2	83,64	0,59
– мокрого тушения	13,5	1,9	12	82,13	0,60

Коксовый орешек по сравнению с металлургическим коксом имел пониженное содержание углерода, повышенное содержание влаги, золы и летучих. В орешке сухого тушения по сравнению с орешком мокрого тушения содержалось меньше золы, летучих, серы и больше углерода (см. таблицу 5.8). Согласно таблице 5.9 с уменьшением крупности кокса в нем увеличивалось содержание золы и летучих, повышалась влажность, уменьшалось содержание углерода.

Таким образом, результаты исследований свидетельствуют о целесообразности вовлечения коксового орешка в состав железорудной части шихты. Эквивалентная по поверхности и средневзвешенная крупность орешка соответствует крупности агломерата и окатышей, используемых на доменных печах ПАО «ММК», что позволяет разрыхлять железорудную часть шихты и улучшать газопроницаемость ее в верхней части печи.

Таблица 5.9 – Технический анализ кокса по фракциям

Параметры, %	Фракция, мм				
	+ 80	60-80	40-60	25-40	10-25
Кокс сухого тушения: $A^d$	12,4	12,8	12,8	13	13,2
$V^{daf}$	1,4	1,2	1,1	1,1	1,5
$W_r$	–	–	–	–	–
C	83,9	83,71	83,68	83,69	83,57
S	0,48	0,51	0,55	0,51	0,51
Кокс мокрого тушения: $A^d$	12,9	13,1	12,7	13,1	13,3
$V^{daf}$	1,4	1,6	1,3	1,4	1,9
$W_r$	2,84	6,52	7,08	13,84	16,1
C	83,67	83,03	83,23	82,73	82,65
S	0,48	0,54	0,56	0,57	0,55
Кокс сухого тушения, отсеянный у доменной печи № 1: $A^d$	–	–	–	13,1	13,8
$V^{daf}$	–	–	–	1,1	1,7
$W_r$	–	–	–	–	–
C	–	–	–	82,77	82,31
S	–	–	–	0,59	0,6
Кокс мокрого тушения, отсеянный у доменной печи №4: $A^d$	–	–	–	13,5	14,3
$V^{daf}$	–	–	–	1,6	1,9
$W_r$	–	–	–	9,1	11,8
C	–	–	–	81,92	81,57
S	–	–	–	0,59	0,60

Коксовый орешек обладает повышенной реакционной способностью по CRI, что благоприятно отразится при загрузке его в зону рудного гребня, где выделяется наиболее высокое количество  $CO_2$ . При этом коксовый орешек имеет повышенную структурную прочность по сравнению со скиповым коксом, что также положительно скажется на его разупрочнении при механическом воздействии на него железорудных материалов [490].

## 5.2 Уменьшение газодинамической напряженности в верхней части печи рациональной загрузкой коксового орешка в колошниковое пространство

На доменных печах ПАО «ММК» № 4, 6 и 9 объемом 1370 и 2014 м<sup>3</sup>, оснащенных компактным БЗУ лоткового типа, исследовали изменение

показателей хода доменного процесса при введении в состав железорудной части шихты коксового орешка [491-493]. Для этого исследовали три парных периода. В базовых (периоды I, III, V) орешек в составе шихты не использовали. В опытных периодах (II, IV, VI) его расход варьировался в пределах 10,9-12,8 кг/т чугуна (таблица 5.10).

Таблица 5.10 – Основные технологические показатели работы доменных печей №№ 4, 6 и 9

Наименование показателей	Доменные печи						
	4 (V=1370)		6 (V=1370)		9 (V=2014)		
	Периоды						
	I	II	III	IV	V	VI	
Длительность периода, сутки	9	9	9	9	7	7	
Расход коксового орешка (сухого), кг/т чугуна	0	12,2	0	12,8	0	10,9	
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна: фактический	434,3	428,1	443,1	438,3	452,3	444,0	
	-	425,2	-	435,5	-	442,7	
Производительность, т/сутки: по фактическому количеству загруженных подач приведенная к условиям базового периода	3654	3706	3260	3158	4542	4810	
	-	3760	-	3290	-	4867	
Расход, м <sup>3</sup> /т чугуна: дутья	1154	1132	1229	1247	1114	1115	
	109,5	110,7	100	109,1	97,4	104,8	
Содержание O <sub>2</sub> в дутье, %	28,1	27,8	27,1	26,6	28,3	28,5	
Расход, кг/т чугуна: сырьевых материалов кварцита руды михайловской	1693	1693	1662	1689	1660	1670	
	-	-	-	-	-	0,12	
	-	-	-	-	43,9	31,5	
Интенсивность хода, т/м <sup>3</sup> сутки: по ЖРС	3,071	3,115	3,956	3,892	3,744	3,988	
	0,701	0,699	0,870	0,835	0,867	0,922	
Рудная нагрузка, т/т	3,613	3,776	3,560	3,740	3,588	3,660	
Содержание Fe в шихте, %	57,19	57,17	58,23	57,32	58,31	57,97	
Содержание в чугуне, %: Si	0,67	0,70	0,71	0,73	0,72	0,72	
	Mn	0,31	0,33	0,28	0,32	0,33	
	S	0,018	0,017	0,021	0,018	0,023	0,020
	C	4,76	4,76	4,64	4,71	4,68	4,67
Содержание в шлаке, %: SiO <sub>2</sub>	36,9	36,6	36,8	36,8	36,3	35,5	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,6	12,8	12,8	12,8	12,7	13,0
	CaO	36,5	36,3	36,0	36,0	36,3	36,4
	MgO	9,3	9,6	9,6	9,6	9,4	9,9
	S	0,693	0,678	0,738	0,699	0,882	0,913

Изучением показателей работы доменных печей № 4 и 9 (таблицы 5.10-5.16) оценили влияние вовлечения орешка в шихту при их работе с верхней лимитирующей по газодинамике зоной. Сравнением работы доменной печи № 6 в периоды III и IV выявили действие введения орешка на ход доменной плавки в условиях лимитирования газодинамики в нижней ее части.

На печах объемом 1370 м<sup>3</sup> загрузку коксового орешка производили в средний рудный скип, обозначенный в матрице загрузки как Р<sub>ор</sub> (см. таблицу 5.11). В скипе материалы располагали следующим образом: на дно высыпали агломерат, орешек располагали предпоследним перед окатышами. В печь материалы поступали в обратном порядке. Таким образом создавались условия для перемешивания железорудных материалов с коксовым орешком и, следовательно, равномерным их распределением по окружности колошника. Согласно физическому моделированию (см. раздел 2, глава 1) показатель равномерности поступления коксового орешка из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи составлял 0,72.

Таблица 5.11 – Матрицы загрузки доменных печей № 4, 6 и 9 в исследуемые периоды (К – кокс, Р – железорудная часть шихты)

Вид материала для ДП 4	Количество оборотов лотка по станциям 1-11 и порциям материалов К, Р на доменных печах																					Вид материала для ДП 2	
	Доменная печь № 4											Доменная печь № 6											
	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2		1
К			1			1	1						1	1			1					К	
К				1			1	1							1			1		1		К	
К						1				2										2	1	К	
Р	3												1	1	1							Р	
Р	1	1	1												1	1	1					Р <sub>ор</sub>	
Р <sub>ор</sub>		1			1		1									1	1	1				Р	
К			1			1	1						Доменная печь № 9										Вид материала для ДП 9
К				1			1	1				1		1				1	3			К	
К						1			2			1					2	3				Р <sub>ор</sub>	
К				1				2			1	1	1			1	2					К	
Р	3											1	1	1		1	1	1				Р <sub>ор</sub>	
Р	1	1	1							1									4			К	
Р <sub>ор</sub>		1			1		1				2	1	1			1		1				Р <sub>ор</sub>	

Выгрузку материалов из шихтового бункера БЗУ в колошниковое пространство печей объемом  $2014 \text{ м}^3$  производили в количестве двух скипов за 6 оборотов. Коксовый орешек располагали в середине объема второго рудного скипа, обозначенный в матрице  $P_{op}$  (см. таблицу 5.11). Согласно физическому моделированию показатель равномерности поступления коксового орешка из бункера БЗУ в кольцевую зону колошника, соответствующую зоне рудного гребня, составлял 0,75.

Наиболее благоприятное изменение хода процессов наблюдали на печах № 4 и 9, работающих с избыточной напряженностью силового взаимодействия потоков шихты и газа в верхней ее части, поскольку вовлечение коксового орешка снижало коэффициент сопротивления шихты в этой зоне на 7,1 % отн. (см. таблицу 5.12).

Таблица 5.12 – Показатели газодинамического режима по периодам

Наименование показателей	Периоды					
	I	II	III	IV	V	VI
Скорость газа на пустое сечение печи в рабочих условиях по температуре и давлению, $\text{м}^3/\text{с}$ :						
на колошнике	1,48	1,58	1,38	1,64	1,40	1,55
в распаре	1,63	1,67	1,48	1,76	1,47	1,55
в горне	2,56	2,58	2,36	2,8	2,22	2,33
Динамический напор газа на пустое сечение печи в рабочих условиях по температуре и давлению, $\text{Н}/\text{м}^2$ :						
на колошнике	1,93	2,11	1,64	2,29	1,83	2,17
в распаре	1,01	1,07	0,84	1,18	0,84	0,95
в горне	1,38	1,41	1,18	1,64	1,11	1,28
Коэффициент сопротивления шихты движению газа:						
на колошнике	1,45	1,32	1,56	1,07	1,53	1,45
в распаре	10,58	10,02	12,31	7,97	14,20	14,22
в горне	5,85	5,73	6,41	4,30	8,39	8,31

Наиболее существенное повышение технико-экономических показателей плавки наблюдали на печи объемом 2014 м<sup>3</sup>. Уменьшение фактического и приведенного расхода кокса составило соответственно 8,3 и 9,6 кг/т чугуна. Достигли это в результате положительного действия коксового орешка на показатели плавки.

Снижение газодинамической напряженности в слое шихты, отдаленной от уровня засыпи на 2-6 м, на печи № 9, работающей с верхней лимитирующей по газодинамике зоной, позволило увеличить расход дутья на 200 м<sup>3</sup>/мин совместно с ростом расхода природного газа на 7,4 м<sup>3</sup>/т чугуна, при повышении интенсивности по железорудному сырью от 3,744 до 3,988 т/(м<sup>3</sup>·сут). Количество фурменного газа увеличилось от 1604 до 1655 м<sup>3</sup>/т чугуна, кинетическая энергия газовой смеси повысилась от 111 до 130 кДж/с, что сопровождалось ростом протяженности рыхлой части фурменного очага на 3,3% отн. (см. таблицу 5.13).

Таблица 5.13 – Показатели горения топлива по периодам

Наименование показателей	Периоды					
	I	II	III	IV	V	VI
Выход фурменного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна	1527	1522	1585	1628	1604	1655
Состав фурменного газа, %:						
CO	37,1	36,7	36,9	36,0	38,3	38,3
H <sub>2</sub>	16,1	16,2	14,4	15,2	13,9	14,3
N <sub>2</sub>	46,8	47,1	48,7	48,8	47,8	47,4
Кинетическая энергия газовой смеси, кДж/с	131	132	201	162	111	130
Протяженность рыхлой части фурменного очага, мм	1027	1030	1112	1069	1042	1076

Повышение расхода природного газа в периоде VI по сравнению с периодом V с 97,4 до 104,8 м<sup>3</sup>/т чугуна обеспечило увеличение содержания водорода в фурменном газе с 13,9 до 14,3 % при неизменном содержании CO (см. таблицу 5.13). Это сопровождалось повышением степени восстановления Fe из FeO водородом и увеличением степени его использования (см. таблицу 5.14) [461].

Использование коксового орешка на доменных печах, работающих с верхней определяющей по газодинамике зоной, сопровождалось увеличением интенсивности теплообмена в зоне с температурами менее 850<sup>0</sup>С и уменьшением ее в зоне с температурами более 850<sup>0</sup>С (см. таблицу 5.15).

Таблица 5.14 – Показатели хода восстановления печей по периодам

Наименование показателей	Периоды					
	I	II	III	IV	V	VI
Степень восстановления Fe из FeO различными восстановителями, %:						
углеродом	31,2	35,5	27,7	31,9	23,5	20,4
монооксидом углерода	42,2	39,2	55,4	43,4	55,8	53,4
водородом	26,6	25,3	19,0	24,7	20,7	26,2
Степень использования газа-восстановителя, %: CO	43,0	43,4	42,1	42,1	45,0	43,4
H <sub>2</sub>	41,4	39,1	31,7	37,9	35,4	42,1

Таблица 5.15 – Показатели тепловой работы печей по периодам

Наименование показателей	Периоды					
	I	II	III	IV	V	VI
Соотношение теплоёмкостей потоков шихты и газа:						
в нижней части печи (с температурами более 850 <sup>0</sup> С)	1,868	1,822	1,874	1,781	1,868	1,851
в верхней части печи (с температурами менее 850 <sup>0</sup> С)	0,810	0,784	0,781	0,782	0,836	0,825

### 5.3 Горячая прочность железорудных материалов

#### 5.3.1 Совместный нагрев агломерата и окатышей с коксом в лабораторных условиях

Провели исследования по изучению горячей прочности окатышей ССГПО после их совместного нагрева с коксом и агломератом ПАО «ММК». В процессе экспериментов навеску испытуемых окатышей и агломерата с

долей их соответственно 0,35 и 0,75 в смеси с коксом при объемной доле ЖРС в интервале от 0,05 до 1 загружали в стакан из нержавеющей стали объемом 120 см<sup>3</sup> и помещали в печь, предварительно нагретую до 500 и 600<sup>0</sup>С. Терморегулятором поддерживали заданную температуру в течение всего времени испытания. По истечении 60 мин выдержки навеску извлекали из печи, выделяли фракцию более 5 мм и отделяли материалы друг от друга.

Прочность железорудных материалов оценивали по сопротивлению их ударным и истирающим нагрузкам, которым подвергается испытываемая проба во вращающейся в вертикальной плоскости со скоростью 27 об/мин в течение 8 мин стальной гладкостенной трубе длиной 1000 мм и диаметром в свету 78,5 мм.

Показателями служили сопротивление удару ( $ГП_{+5}$ ) и истиранию ( $ГП_{0,5}$ ). С целью их определения пробы после извлечения из печи последовательно рассеивали на решетке с ячейками диаметром 5 мм и сите с ячейками 0,5×0,5 мм, добиваясь полного отсева подрешетного продукта, т.е. класса 0-5 мм и фракции 0-0,5 мм, обращая особое внимание на полный отсев фракции 0-0,5 мм как трудно отсеваемой. Процентное содержание в испытанной пробе окатышей классов +5 и 0-0,5 мм характеризовали соответственно сопротивлением удару и истиранию.

Расчетное уравнение для определения этих характеристик:

$$[ГП_{+5}, ГП_{0,5}] = \frac{[M_{+5}, M_{-0,5}]}{МП} \cdot 100, \% \quad (5.1)$$

где  $M_{+5}$ ,  $M_{0,5}$  – соответственно масса в испытанной пробе железорудного сырья классов +5 и 0-0,5 мм, г;

$МП$  – общая масса испытанной пробы, полученной как сумма железорудного сырья классов +5; 0,5-5 и 0-0,5 мм, г.

Повышение объемной доли кокса в смеси железорудного сырья и кокса уменьшало сопротивление окатышей и агломерата ударным нагрузкам (показатель  $ГП_{+5}$ ) в соответствии с рисунком 5.3. При этом истираемость железорудных материалов (показатель  $ГП_{+5}$ ) увеличивалась.

Нагрев смеси железорудного сырья и кокса до температуры  $500^{\circ}\text{C}$  при объемной доли ЖРС 0,05 обеспечивал выход фракции +5 мм у агломерата и окатышей соответственно, равный 99,8 и 80,4%. Повышение объемной доли ЖРС до с 0,05 до 1 сопровождалось увеличением выхода класса +5 мм на 5,0 и 8,52% абс. соответственно у окатышей и агломерата. Нагрев агломерата и окатышей в смеси с коксом до температуры  $600^{\circ}\text{C}$  обеспечивал уменьшение выхода фракции +5 мм у агломерата на 3,7% отн. при сохранении таковой у окатышей (рисунок 5.4).

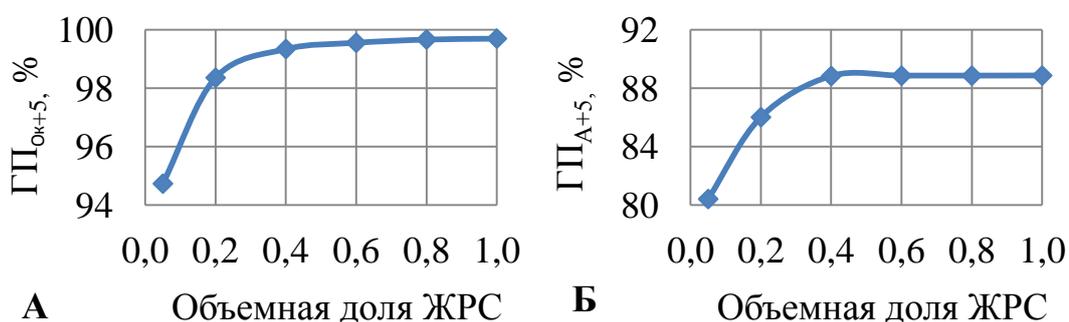


Рисунок 5.3 – Зависимость сопротивления годных окатышей (А) и агломерата (Б) удару от объемной доли железорудного сырья при температуре нагрева  $500^{\circ}\text{C}$

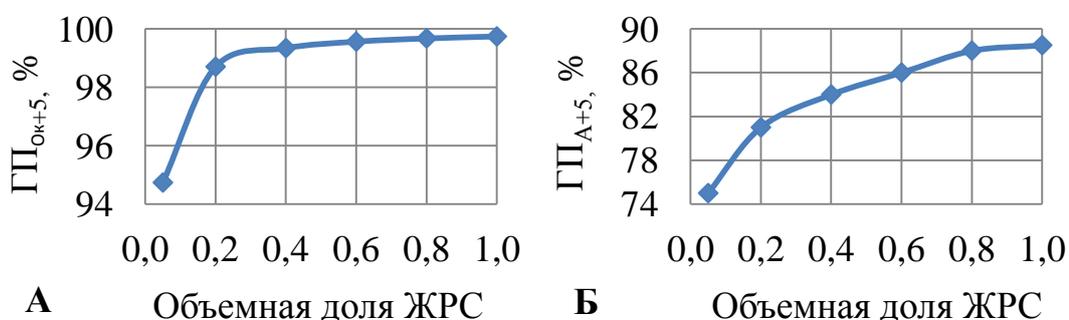


Рисунок 5.4 – Зависимость сопротивления годных окатышей (А) и агломерата (Б) удару от объемной доли железорудного сырья при температуре нагрева  $600^{\circ}\text{C}$

Таким образом, из анализа результатов следует, что разрушение железорудных материалов по радиусу доменной печи от воздействия температуры и газа восстановителя различно. В зоне рудного гребня в условиях пониженного количества газа-восстановителя и более низкой температуры разупрочнение железорудных материалов происходит медленнее, чем в периферийной зоне печи или промежуточной между зонами рудного

гребня и центром. В связи с этим на доменных печах, оснащенных БЗУ лоткового типа, при работе на многокомпонентной шихте необходимо учитывать величину горячей прочности железорудных материалов при распределении их по радиусу колошника.

### 5.3.2 Прочность по LTD<sub>+6,3</sub>

В условиях ПАО «ММК» используется многокомпонентная шихта, состоящая из агломерата и окатышей различных производителей. В том числе окатыши ССГПО, Михаловского, Лебединского, Костомукшского и Качканарского ГОКов. Железорудное сырье различных поставщиков имеет существенное отличие по горячей прочности (LTD<sub>+6,3</sub>), определенной по ISO 13930:2007 на установке фирмы ЛЕКО, представленной на рисунке 5.5:

Вид железорудного сырья	Горячая прочность LTD (+6,3), %
Михайловские	95
Качканарские	85
Лебединские	80
Костомукшские	75
ССГПО	70
Агломерат ММК	54



Рисунок 5.5 – Шкаф управления и горизонтальная печь для определения горячей прочности железорудных материалов по ISO 13930:2007

Наибольшей прочностью обладают окатыши Михайловского ГОК. Наименее прочными среди окатышей являются окатыши ССГПО. В связи с этим целесообразно в зону рудного гребня преимущественно загружать окатыши ССГПО и Костомукшского ГОК. Окатыши Лебединского и Михайловского ГОКов необходимо располагать в периферийной части колошника и в зоне между рудным гребнем и центром, где развиваются наиболее высокие температуры и повышенное количество газавосстановителя. Окатыши Качканарского ГОК в виду величины их горячей прочности и повышенного содержания  $TiO_2$  необходимо размещать в пристеночной зоне печи для максимального контакта их с футеровкой горна. Горячая прочность агломерата уступает прочности окатышей любого из производителей. В связи с этим отдаление большей их части от периферии в сторону зоны рудного гребня будет сопровождаться уменьшением разупрочнения агломерата в верхней части печи.

#### **5.4 Показатели работы доменных печей ПАО «ММК»**

##### **5.4.1 Влияние горячей прочности агломерата и окатышей на показатели хода процессов**

На доменных печах № 2, 4, 6, 9 и 10 исследовали влияние повышения горячей прочности железорудных материалов на технико-экономические показатели их работы [494-496]. Проанализировали изменение горячей прочности в 19 парных периодах длительностью по месяцу как отдельно для окатышей и агломерата, так и при совместном действии их горячей прочности на показатели работы печей. Причем исследовали изменение прочности окатышей как за счет уменьшения или увеличения ее величины в окатышах одного производителя, так и за счет уменьшения доли менее прочных окатышей при увеличении содержания в шихте более прочных. Все периоды для агломерата, окатышей и совместного их влияния усреднили в два периода для каждой группы (таблицы 5.16-5.17).

Повышение горячей прочности окатышей одного производителя сопровождалось уменьшением прочностных характеристик их в холодном состоянии. В условиях повышения горячей прочности железорудных материалов путем уменьшения доли окатышей одного вида на другой сопровождалось повышением их прочности в холодном состоянии.

В периоде IV по сравнению с периодом III повышение горячей прочности ЖРС по LTD (+6,3) с 55,7 до 57,3% сопровождалось снижением сопротивления окатышей сжатию с 221 до 209 кг/окатыш и прочности на удар с 82,2 до 81,2%, при увеличении фракции -0,5 мм с 4,6 до 4,8% (см. таблицу 5.16).

Таблица 5.16 – Крупность и прочность железорудного сырья

Наименование показателей	Средневзвешенная горячая прочность LTD (+6,3) ЖРС, %							
	61,9	64,5	55,7	57,3	60,5	62,4	58,2	62,4
Материал, обеспечивающий повышение горячей прочности	Агломерат		Окатыши		Окатыши (замена вида окатышей)		Совместное влияние агломерата и окатышей	
Номер периода	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Горячая прочность LTD (+6,3), %: агломерата, окатышей	52,0 81,8	56,0 79,0	52,7 65,3	52,7 71,1	54,1 74,1	54,4 77,4	50,2 71,7	54,4 74,8
Сопротивление окатышей сжатию, кг/окатыш	223	241	221	209	238	245	231	260
Прочность на удар (+5 мм), %:								
окатышей	88,3	88,0	92,7	88,0	84,5	90,0	88,0	89,5
агломерата	82,9	84,2	78,4	79,2	80,9	81,8	80,9	81,5
ЖРС	84,7	85,6	82,2	81,2	82,1	84,7	83,6	84,3
Сопротивление истиранию (-0,5 мм), %:								
окатышей:	5,5	5,4	7,1	9,0	6,4	5,0	5,6	5,2
агломерата	3,8	3,5	3,8	3,6	3,8	3,6	4,5	4,3
ЖРС	4,4	4,2	4,6	4,8	4,6	4,1	4,9	4,6
Эквивалентная по поверхности крупность, мм:								
окатышей	12,2	11,9	12,2	12,2	12,1	11,7	12,2	12,1
агломерата	10,3	10,3	10,2	10,1	10,0	10,0	10,1	10,1
ЖРС	10,9	10,9	10,7	10,6	10,7	10,6	10,9	10,8

Увеличение горячей прочности окатышей с 60,5 до 62,4% за счет уменьшения доли окатышей ССГПО с 0,64 до 0,18% от расхода окатышей и

повышения доли окатышей Михаловского, Лебединского и Костомукшского ГОКов соответственно с 0,30 до 0,59%, с 0,01 до 0,13 % и с 0,04 до 0,11 % обеспечивало рост сопротивления окатышей сжатию с 238 до 245 кг/окатыш и повышение прочности на удар с 84,5 до 90%. Однако увеличение доли окатышей Михайловского ГОК в периоде IV по сравнению с периодом III сопровождалось уменьшением эквивалентной по поверхности крупности окатышей с 12,1 до 11,7 мм, что в среднем сопровождалось снижением крупности ЖРС с 10,7 до 10,6 мм.

Повышение горячей прочности железорудных материалов приводит к снижению интенсивности их разрушения в верхней части шахты доменной печи. Это улучшает газодинамику процесса, что положительно сказывается на интенсивности по дутью и железорудному сырью, а также повышению химической и тепловой энергии газового потока. В исследуемых периодах увеличение горячей прочности ЖРС на 2,9% сопровождалось снижением коэффициента сопротивления шихты движению газового потока на 5,8% (таблица 5.17) за исключением периода, где наряду с повышением горячей прочности окатышей наблюдали уменьшение холодной прочности по различным показателям. Снижение газодинамической напряженности в верхней части печи обеспечивало повышение выхода фурменного газа на 21 м<sup>3</sup>/мин на 1% уменьшения горячей прочности ЖРС по LTD(+6,3). В том числе рост расхода природного газа в среднем составил 137 м<sup>3</sup>/ч при повышении степени использования водорода на 0,33% отн. Наиболее высокую величину повышения расхода газа, равную 140 м<sup>3</sup>/ч, наблюдали в условиях роста горячей прочности агломерата, наименьшую – при увеличении прочности окатышей. Это является результатом более высокой величины горячей прочности у окатышей по сравнению с агломератом при более низкой доле первых в составе шихты – 30-40%. Одновременное повышение сопротивления железорудных материалов разупрочнению их при нагреве сопровождалось работой печи с наиболее высоким увеличением расхода природного газа, равным 174 м<sup>3</sup>/ч на 1% уменьшения горячей прочности ЖРС по LTD(+6,3).

Таблица 5.17 – Основные показатели работы доменных печей № 2, 4, 6, 9 и 10  
 ПАО «ММК» при изменении горячей прочности железорудных материалов

Наименование показателей	Средневзвешенная горячая прочность LTD (+6,3) ЖРС, %							
	61,9	64,5	55,7	57,3	60,5	62,4	58,2	62,4
Материал, обеспечивающий повышение горячей прочности	Агломерат		Окатыши		Окатыши (замена вида окатышей)		Совместное влияние агломерата и окатышей	
Номер периода	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Расход: дутья, м <sup>3</sup> /мин ПГ, тыс. м <sup>3</sup> /час	3327 18,9	3363 19,2	3390 17,0	3423 17,3	3237 16,9	3313 17,1	3400 16,3	3497 16,8
Расход водяного пара, г/м <sup>3</sup>	4,3	4,3	4,6	3,4	4,0	3,5	4,9	5,6
Выход фурменного газа, м <sup>3</sup> /мин	3381	3414	4024	4060	3732	3791	4087	4167
Содержание кислорода, %	27,0	27,2	26,6	26,7	27,4	27,2	26,4	26,8
Коэффициент сопротивления шихты движению газа вверх шахты $\lambda_{\text{в}}$	0,33	0,30	0,19	0,20	0,31	0,28	0,40	0,40
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна: фактический приведенный	446,8 -	446,6 445,5	455,2 -	448,8 454,3	454,6 -	454,0 453,2	461,7 -	460,8 460,0
Производительность, т/сут: по фактическому количеству загруженных подач приведенная	4382 -	4392 4385	3988 -	4048 4053	4256 -	4293 4274	3890 -	3913 3910
Степень использования газа-восстановителя, %: CO H <sub>2</sub>	43,7 46,1	44,4 46,2	44,2 45,1	44,8 45,2	44,1 43,7	44,9 43,9	44,1 42,8	44,9 43,0
Температура кладки в шахте печи, °С	35,7	37,4	25,3	27,3	37,8	41,8	51,0	54,9
Увеличение расхода природного газа, м <sup>3</sup> /ч, на 1% горячей прочности по LTD(+6,3)	140		123		111		174	

В результате в исследуемые периоды работы доменных печей № 2, 4, 6, 9 и 10 ПАО «ММК» увеличение горячей прочности железорудного сырья на 1% в интервале от 55,7 до 64,5% сопровождалось уменьшением удельного расхода кокса на 1,23 кг/т чугуна.

Повышение горячей прочности железорудных материалов отрицательно действовало на футеровку шахты печи. Рост горячей прочности по LTD на 1% на доменных печах № 2, 4, 6, 9 и 10 ПАО «ММК» сопровождался повышением средней температуры шахты печи на 1,2<sup>0</sup>С.

Анализом двух парных периодов работы доменной печи № 10 ПАО «ММК» оценили влияние горячей прочности окатышей на показатели хода процессов. Изменение горячей прочности в исследуемых периодах обеспечивали уменьшением доли более прочных окатышей Михайловского ГОК на менее прочные окатыши ССГПО в периоде VI-I по сравнению с периодом V-I и увеличением более прочных окатышей Михайловского ГОК при уменьшении доли окатышей ССГПО в условиях вовлечения окатышей Костомукшского ГОК в периоде VI-II по сравнению с периодом V-II (таблица 5.18). Результаты анализа работы печи № 10 приведены в таблицах 5.19-5.24.

Таблица 5.18 – Показатели качества шихтовых материалов, используемых на печи № 10

Наименование показателей	Средневзвешенная горячая прочность LTD(+6,3) окатышей, %			
	71,7	66,5	80,5	84,0
Номер периода	V-I	VI-I	V-II	VI-II
Содержание окатышей от железорудной части шихты, %	37	36	29	31
Горячая прочность по LTD(+6.3), %: агломерата ЖРС	53,1	54,6	54,2	54,5
	59,8	57,8	62,0	64,1
Прочность на сжатие окатышей, кг/окатыш	204	243	265	277
Прочность на удар (+5 мм), %: агломерата окатышей ЖРС	82,6	81,9	81,6	82,8
	91,9	88,2	89,5	90,3
	86,0	84,2	83,9	85,1
Содержание (%) по классам крупности окатышей, мм: +15 10-15 5-10 0-5	17,3	20,2	16,9	6,4
	74,1	71,5	75,3	83,5
	5,8	5,6	4,8	6,5
	2,8	2,7	3,0	3,6
Содержание (%) по классам крупности агломерата, мм: +25 10-25 5-10 0-5	27,7	27,7	28,2	27,8
	36,9	37,2	35,1	34,7
	26,6	26,3	28,2	28,9
	8,9	8,7	8,6	8,5
Содержание золы в коксе, %	12,81	12,72	12,90	12,94
Холодная прочность кокса по показателям, %: M10 M25	9,3	9,4	8,9	8,78
	86,6	86,1	85,5	86,3
Горячая прочность кокса по CSR, %	48,8	48,8	51,1	49,3
Реакционная способность по CRI, %	32,8	32,8	31,7	32,6
Эквивалентная по поверхности крупность, мм: агломерата окатышей ЖРС	9,9	10,0	9,9	9,9
	11,6	11,7	11,5	10,8
	<b>10,5</b>	<b>10,6</b>	<b>10,5</b>	<b>10,2</b>

При уменьшении горячей прочности окатышей в периоде VI-I по сравнению с периодом V-I с 71,7 до 66,5% произошли следующие основные изменения по ходу процессов: увеличился коэффициент сопротивления шихты в верхней части печи на 12,7% (см. таблицу 5.19); уменьшился выход колошникового газа на 4,2 % (см. таблицу 5.20); снизилась интенсивность по сырью от 4030 до 4001 кг/(м<sup>3</sup>·сут). Рост выхода фурменного газа от 1545 до 1571 м<sup>3</sup>/т чугуна, кинетической энергии газозвдушной смеси в фурмах от 155 до 157 кДж (см. таблицу 5.21), скорости газа в нижней части заплечиков от 2,26 до 2,29 м/с, а динамического напора газа от 1,12 до 1,14 Н/м<sup>2</sup>, были приемлемыми для ровного схода шихты.

Таблица 5.19 – Показатели газодинамического режима печи № 10 по периодам

Наименование показателей	Горячая прочность LTD (+6,3)окатышей, %			
	71,7	66,5	80,5	84,0
Номер периода	V-I	VI-I	V-II	VI-II
Степень уравнивания шихты подъёмной силой газового потока, %	41,7	41,7	43,9	43,1
Скорость газа на пустое сечение печи в рабочих условиях по температуре и давлению, м/с:				
на колошнике	1,43	1,45	1,58	1,50
в распаре	1,48	1,50	1,55	1,54
в горне	2,26	2,29	2,36	2,32
Динамический напор газа на пустое сечение печи в рабочих условиях по температуре и давлению, Н/м <sup>2</sup>				
на колошнике	1,95	2,00	2,28	2,13
в распаре	0,83	0,85	0,93	0,90
в горне	1,12	1,14	1,23	1,17
Коэффициент сопротивления шихты движению газа:				
на колошнике	0,14	0,16	0,16	0,17
в распаре	16,85	16,34	15,59	15,5
в горне	5,5	5,5	5,4	5,1

Менее интенсивное разрушение окатышей при нагреве в восстановительной атмосфере в периоде VI-II компенсировало понижение эквивалентной по поверхности крупности железорудной части шихты на 2,9%, которое являлось результатом повышения доли Михайловских окатышей и

понижения доли окатышей ССГПО. Такое изменение состава привело к сокращению содержания фракции +15 мм в окатышах от 16,9 до 6,4% абс. и росту содержания класса 0-5 мм в них от 3,0 до 3,6 мм. При этом воздействие крупности материала на траекторию его движения с лотка повысило загруженность периферии, на что указывает снижение разности средних величин температур газа на периферии и в газоотовах от 174 до 131С<sup>0</sup> (см. таблицу 5.24). Увеличение коэффициента сопротивления шихты в верхней части печи от этого составило 5,6% отн. (см. таблицу 5.19).

Таблица 5.20 – Показатели интенсивности доменной печи № 10 по периодам

Наименование показателей	Горячая прочность LTD (+6,3)окатышей, %			
	71,7	66,5	80,5	84,0
Номер периода	V-I	VI-I	V-II	VI-II
Производство чугуна и шлака на 1 м <sup>3</sup> объёма печи, т/сут	3,409	3,388	3,549	3,553
Интенсивность по топливу (сыхому коксу, коксовой фракции + природному газу), кг/(м <sup>3</sup> ·сут)	1251	1261	1320	1303
Интенсивность по суммарному углероду т/(м <sup>3</sup> сут)	0,93	0,95	1,0	0,99
Интенсивность по сырью, кг/(м <sup>3</sup> ·сут)	4030	4001	4197	4192
Интенсивность хода по дутью, м <sup>3</sup> /(м <sup>3</sup> мин)	1,83	1,85	1,88	1,89
Интенсивность по газу, м <sup>3</sup> /(м <sup>3</sup> ·мин):				
колошниковому	2,848	2,863	2,990	2,927
фурменному	2,609	2,622	2,729	2,649
в распаре	2,691	2,707	2,823	2,752
в шахте	2,768	2,783	2,903	2,834
Интенсивность накопления продуктов плавки в горне, м <sup>3</sup> ·мин	1,201	1,201	1,248	1,256
Степень заполнения продуктами плавки межкусковых пустот кокса, %	84,28	83,04	81,51	83,37
Интенсивность орошения кокса продуктами плавки, т/т	3,132	3,068	3,035	3,088
Выход колошникового газа, м <sup>3</sup> /мин	5758	5519	5843	5773

Увеличение газодинамической напряженности в верхней части печи в периоде VI-I по сравнению с периодом V-I, вследствие ухудшения горячей прочности окатышей, обусловило появление каналов в слое шихты, кратковременных подстоев её и продувов, что сопровождалось уменьшением

химической степени использования водорода и монооксида углерода соответственно на 7,0 и 0,23 % отн. (см. таблицу 5.19). Из-за неровного схода шихты уменьшили расход природного газа на 800 м<sup>3</sup>/час в опытном периоде по сравнению с базовым. Изменения в структуре слоя шихты и окатышей сильнее отразились на восстановлении водородом, что проявилось в снижении соотношения степеней использования H<sub>2</sub> и CO от 0,89 до 0,83. Степень восстановления Fe из FeO водородом в периоде VI-I по сравнению с периодом V-I снизилась от 21,0 до 19,4 % при увеличении степени восстановления твердым углеродом от 26,4 до 27,8 %.

Таблица 5.21 – Показатели горения топлива в доменной печи № 10  
по периодам

Наименование показателей	Горячая прочность LTD (+6,3) окатышей, %			
	71,7	66,5	80,5	84,0
Выход фурменного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна	1545	1571	1550	1510
Состав фурменного газа, %: CO	37,8	37,9	38,0	37,5
H <sub>2</sub>	13,4	13,0	11,9	12,3
N <sub>2</sub>	48,8	49,1	50,1	50,2
Теоретическая температура горения, °С	2121	2125	2161	2141
Масса газоздушнoй смеси на одну фурму, кг/с	0,355	0,357	0,376	0,364
Скорость газоздушнoй смеси в фурмах, м/с:				
	в нормальных условиях	205	206	218
в рабочих условиях	299	299	312	309
Кинетическая энергия газоздушнoй смеси, кДж	155	157	179	171
Протяженность рыхлой части фурменного очага, мм	1079	1084	1110	1094

Повышение горячей прочности окатышей от 80,5 до 84,0 % в периоде VI-II по сравнению с периодом V-II создало возможность для роста потребления природного газа от 17,9 до 18,3 м<sup>3</sup>/ч. Улучшилась ровность схода шихты за счёт исключения каналов в слое, кратковременных подстоев её и продувов. Это увеличило степень использования водорода и монооксида углерода соответственно на 6,2 и 1,9 % отн. Рост горячей прочности окатышей по LTD (+6,3) означал их изменение, приводящее к смещению процессов восстановления железа из оксидов в область повышенных температур, где

полнее используется водород по сравнению с монооксидом углерода. По этой причине соотношение степеней использования  $H_2$  и  $CO$  выросло от 0,75 до 0,79. Повышение расхода природного газа обеспечивало рост степени восстановления  $Fe$  из  $FeO$  водородом от 15,4 до 16,6% (см. таблицу 5.23).

Изменение структуры шихты и окатышей при технологических параметрах первой пары периодов и при реализации преимуществ окатышей с повышенной горячей прочностью во второй, включало показатели тепловой работы печи, которые представлены в таблице 5.22.

Таблица 5.22 – Основные показатели тепловой работы печи № 10 по периодам

Наименование показателей	Средневзвешенная горячая прочность LTD(+6,3) окатышей, %			
	71,7	66,5	80,5	84,0
Соотношение теплоёмкостей потоков шихты и газа:				
в нижней части печи (с температурами более 850 <sup>0</sup> С)	1,957	1,959	2,025	1,994
в верхней части печи (с температурами менее 850 <sup>0</sup> С)	0,892	0,890	0,847	0,869
Суммарный расход тепла на проведение всех процессов в определяющей по его потреблению зоне, МДж/т чугуна	2872	2945	2960	2833
Потери тепла в определяющей зоне, %	31,9	32,3	33,2	26,2

Таблица 5.23 – Показатели хода восстановления в доменной печи № 10 по периодам

Наименование показателей	Средневзвешенная горячая прочность LTD(+6,3) окатышей, %			
	71,7	66,5	80,5	84,0
Номер периода	V-I	VI-I	V-II	VI-II
Степень восстановления $Fe$ из $FeO$ различными восстановителями, %:				
углеродом	26,4	27,8	28,7	31,5
монооксидом углерода	52,6	52,8	55,9	51,9
водородом	21,0	19,4	15,4	16,6
Степень использования газа-восстановителя, %: $CO$	43,8	43,7	42,2	43,0
$H_2$	38,8	36,1	31,8	33,9
Соотношение степеней использования $H_2$ и $CO$	0,89	0,83	0,75	0,79



2,025 до 1,994 и увеличением ее в верхней от 0,847 до 0,869. Получили уменьшение суммарного расхода тепла в определяющей зоне от 2960 до 2833 МДж/т чугуна с соответствующим сокращением удельного расхода кокса.

#### **5.4.2 Разработка рациональных режимов загрузки в зависимости от горячей прочности железорудных материалов**

В виду различия горячей прочности между железорудными компонентами шихты и сильным влиянием ее величины на показатели работы доменной печи целесообразно разработать рациональные режимы загрузки агломерата и окатышей, по видам имеющих различные величины горячей прочности.

Согласно лабораторным испытаниям (см. пункт 5.3.1) наибольшее разупрочнение железорудных материалов наблюдали в условиях повышенного количества кокса, откуда следует, что железорудные материалы, имеющие наиболее низкую горячую прочность, целесообразно размещать в зоне рудного гребня.

В связи с этим провели исследования на доменных печах № 2 и 4 ПАО «ММК» по изменению режима загрузки агломерата и окатышей в колошниковое пространство печи. На доменной печи № 2 увеличивали количество агломерата, поступающего в зону рудного гребня, путем повышения их доли на 15% во втором и третьем рудных скипах, содержимое которых поступало со станций углового положения лотка № 6-8 матрицы загрузки (таблица 5.25), уменьшая в рудном скипе, раскручиваемом в периферийной части печи. Изменение доли производили постепенно. В первом опытном периоде на 10%. Во втором дополнительно на 5%. В периоде III увеличили долю агломерата во втором и третьем скипах, содержимое которых поступало в колошниковое пространство, соответствующее от  $2/3$  до  $3/4$  радиуса колошника, со станций углового положения лотка № 6-8 матрицы

загрузки до 70% (таблица 5.26). При этом на такую же величину понижали долю агломерата в первом рудном скипе, содержимое которого поступало в периферийную часть колошника. Общая доля окатышей от расхода железорудной части шихты не изменялась и составляла 40% в периодах I-III.

Таблица 5.25 – Матрицы загрузки доменных печей № 2 и 4 в исследуемые периоды (К – кокс, Р – железорудная часть шихты)

Номер и вид материала для ДП 2	Количество оборотов лотка по станциям 1-11 и порциям материалов К, Р на доменных печах																				Номер и вид материала для ДП 4					
	2										4															
	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	11	10	9	8	7	6	5	4	3			2	1		
1	К				1	1	1									1	1	1					1	К		
2	К				1	1	1									1	1		1					2	К	
3	К							1	1		1				1	1	1								3	Р
4	Р			2	1											1	1	1							4	Р
5	Р				1	1	1									1	1	1							5	К
6	Р				1	1	1										1	2							6	К
7	К			1	1	1																	2	1	7	К
8	К						2			1			1	1	1										8	Р
9	К							2	1						1	1	1								9	Р
10	Р			1	2										1	1		1							10	К
11	Р					1	1	1									1	1	1						11	К
12	Р					1	1	1							1	1	1								12	Р
13	К			1	1	1	1									1	1	1							13	Р
14	К				1	1	1																		....	
15	К								1	1	1						1	1	1						26	Р
16	Р			2	1																					
17	Р						1	1	1																	
18	Р					2	1																			

На доменной печи № 4 ПАО «ММК» исследовали два периода. В первом доля агломерата, поступающего в зону рудного гребня, составляла 65% от содержимого скипа (таблица 5.27). Во втором периоде долю агломерата, уменьшили с 65 до 54%, соответственно, увеличив на 11% количество поступающего агломерата в периферийную часть печи.

Результаты работы печи в исследуемые периоды приведена в таблицах 5.28 – 5.30.

Таблица 5.26 – Содержимое рудных скипов доменной печи № 2 в исследуемые периоды

Масса компонентов шихты, поступающей на станции углового положения лотка матрицы загрузки, кг	Доля агломерата в рудных скипах, содержимое которых поступало в пространство, соответствующее 2/3-3/4 радиуса колошника от его центра, %		
	45	60	70
№ 9-8 (1-й рудный скип):			
– агломерат	9750	9000	7500
– окатыши Костомукшские	4125	1500	-
– окатыши Михайловские	1125	4500	7500
– кварцит	100	100	100
№ 8-5 (2-й рудный скип):			
– агломерат	8250	9000	9750
– окатыши Костомукшские	1625	1500	2250
– окатыши Михайловские	5125	4500	3000
– коксовая фракция	200	200	200
№ 8-5 (3-й рудный скип):			
– агломерат	8250	9000	9750
– окатыши Костомукшские	1625	1500	2250
– окатыши Михайловские	5125	4500	3000
– коксовая фракция	200	200	200

Таблица 5.27 – Содержимое рудных скипов доменной печи № 4 в исследуемые периоды

Масса компонентов шихты, поступающей на станции углового положения лотка матрицы загрузки, кг	Доля агломерата в рудных скипах, содержимое которых поступало в пространство, соответствующее 2/3-3/4 радиуса колошника от его центра, %	
	65	54
№ 11-8 (1-й рудный скип):		
агломерат	10200	10500
окатыши	6300	6000
коксовая фракция	200	200
кварцит	200	200
№ 8-5 (2-й рудный скип):		
агломерат	10200	8900
окатыши	6300	7600
коксовая фракция	200	200
кварцит	200	200

Увеличение доли окатышей вместо агломерата, поступающих в периферийную часть печи, обладающих более высокой горячей прочностью и большим фракционным составом, обеспечивало более высокую газопроницаемость этой зоны. В результате увеличилось количество газа, проходящего через нее, на что указывает рост разности между температурами периферийного и колошниковогаз. В периодах II и III разность между температурами ( $T_{\text{пер}}-T_{\text{кол}}$ ) составляла соответственно 264 и 297<sup>0</sup>С против 244<sup>0</sup>С в периоде I (см. таблицу 5.28).

Таблица 5.28 – Параметры колошниковогаз доменных печей № 2 и 4

Наименование показателей	Доля агломерата в рудных скипах, содержащее которых поступало в пространство, соответствующее 2/3-3/4 радиуса колошника от его центра, %				
	45	60	70	65	54
Режим загрузки добавочных материалов в скип	вперемешку				
Доменная печь	2			4	
Длительность периода, сут	7	7	8	14	14
Состав колошниковогаз, %:					
CO <sub>2</sub>	18,6	18,6	19,3	20,1	19,7
CO	24,9	24,6	24,7	25,5	25,4
H <sub>2</sub>	8,7	8,7	8,6	9,0	9,0
Степень использования, % CO	42,8	43,4	43,9	44,1	43,6
H <sub>2</sub>	39,7	39,9	42,2	37,3	35,7
Температура газ, <sup>0</sup> С:					
в газоотводах	113	119	123	208	189
на периферии под газоотводами	99	99	102	188	169
на периферии в шахте	358	383	420	358	361
Градиент температуры газ, <sup>0</sup> С:					
в газоотводах	13,8	16,3	18,8	105	90
на периферии под газоотводами	33,4	36,1	41,8	84	94
на периферии в шахте	238	405	472	354	355
Давление колошниковогаз, кПа	142,0	142,0	141,9	137,7	139,6
Уровень засыпи фактический, м	1,6	1,5	1,5	1,6	1,6
Температура газ по радиусу, <sup>0</sup> С:					
на периферии $T_{\text{пер}}$	112	116	123	291	277
в рудном гребне $T_{\text{гр}}$	93	95	98	205	192
в центре печи $T_{\text{ц}}$	466	491	489	289	346
$T_{\text{пер}}-T_{\text{кол}}$	244	264	297	150	172

Рациональное радиальное распределение материалов различной прочности при температуре 600<sup>0</sup>С снизило газодинамическую напряженность в верхней части печи. Коэффициент сопротивления шихты снизился в периодах II и III по сравнению с периодом I соответственно на 6,5 и 12,1% (см. таблицу 5.29). Это позволило увеличить интенсивность хода по дутью в периодах II и III по сравнению с периодом I соответственно на 4,4 и 4,8% (см. таблицу 5.29). Расход дутья в опытных периодах увеличился по сравнению с базовым соответственно на 143 и 149 м<sup>3</sup>/мин при сохранении расхода природного газа (см. таблицу 5.30). Уменьшили уровень засыпи в опытных периодах по сравнению с базовым с 1,6 до 1,5 м.

Таблица 5.29 – Основные технологические показатели работы доменных печей № 2 и 4

Наименование показателей	Доля агломерата в рудных скипах, содержащее которых поступало в пространство, соответствующее 2/3-3/4 радиуса колошника от его центра, %				
	45	60	70	65	54
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна: фактический приведенный	469,8 -	465,6 468,4	458,3 465,2	500,1 -	520,0 528,4
Производительность, т/сут: по фактическому количеству загруженных подач приведенная	3633 -	3592 3635	3627 3641	3413 -	3298 3269
Расход сырьевых материалов, кг/т чугуна	1670	1672	1669	1671	1666
Доля окатышей от ЖРС, %	40	40	40	38	41
Интенсивность хода: по дутью, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> мин, по суммарному углероду, т/м <sup>3</sup> ·сут	2,28 1,03	2,38 1,02	2,39 1,01	1,93 1,04	1,93 1,05
Рудная нагрузка, т/т	3,55	3,59	3,64	3,3	3,2
Содержание Fe в шихте, %	58,14	58,07	58,19	58,1	58,3
Вынос пыли и шлам ВФУ, кг/т чугуна	7,6	7,4	7,3	23,8	19,6
Температура холодильников шахты, °С	47,1	47,0	47,5	36,9	35,8
Коэффициент сопротивления шихты движению газов: на колошнике в горне	1,99 10,26	1,72 9,19	1,54 9,26	3,82 13,06	3,91 13,16

Таблица 5.30 – Параметры дутья на доменных печах № 2 и 4

Наименование показателей	Доля агломерата в рудных скипах, содержащее которых поступало в пространство, соответствующее 2/3-3/4 радиуса колошника от его центра, %				
	45	60	70	65	54
Расход: дутья, м <sup>3</sup> /мин	3121	3264	3270	2642	2644
дутья, м <sup>3</sup> /т чугуна	1237	1308	1299	1115	1155
природного газа м <sup>3</sup> /т чугуна	112,2	112,2	111,2	105,0	109,0
тыс. м <sup>3</sup> /ч	17,0	16,8	16,8	14,9	15,0
Давление горячего дутья, кПа	261,0	258,4	260,1	255	256
Температура дутья, °С	1134	1134	1133	1174	1171
Расход водяного пара, г/м <sup>3</sup>	4,58	4,52	6,31	3,4	1,4
Содержание кислорода, %	27,2	26,7	27,0	28,6	28,0

Эффективная организация доменного процесса путем использования рационального режима загрузки окатышей и агломерата сопровождалось повышением химической степени использования газового потока. Степень использования монооксида углерода и водорода повысилась соответственно на 1,1 и 2,5 % абс. в периоде III по сравнению с периодом I. Это сопровождалось снижением удельного расхода кокса как фактической величины с 469,8 до 458,3 кг/т чугуна, так и приведенной к условиям базового периода с 469,8 до 465,2 кг/т чугуна (см. таблицу 5.29).

На доменной печи № 4 ПАО «ММК» в условиях уменьшения доли агломерата, поступающего в зону рудного гребня, и увеличения его количества на периферии сопровождалось ухудшением ее работы. Разупрочнение агломерата в верхней зоне печи затрудняло проход газа через слой шихты. В условиях сохранения интенсивности по дутью это привело к повышению коэффициента сопротивления шихты движению газового потока в верхней части печи на 2,4% отн. (см. таблицу 5.29). Следствием нерационального распределения материалов по радиусу печи являлось менее эффективное использование химической энергии газового потока в опытном периоде V по сравнению с базовым IV. Степень использования СО уменьшилась с 44,1 до 43,6 %, водорода снизилась с 37,3 до 35,7% (см. таблицу 5.28), что привело к перерасходу кокса в опытном периоде.

Размещение повышенной доли агломерата в зоне рудного гребня за счет уменьшения его доли на периферии приводит к увеличению содержания окатышей в пристеночной зоне печи, что отрицательно сказывается на стойкости футеровки. В исследуемых периодах на доменной печи № 2 температура холодильников шахты в опытных периодах увеличилась с 47,1 до 47,5 °С за 14 сут. Понижение доли окатышей на периферии доменной печи № 4 сопровождалось уменьшением температуры холодильников шахты с 36,9 до 35,8°С (см. таблицу 5.29).

Длительная работа печи с режимом загрузки, предполагающим поступление повышенной доли окатышей в пристеночную зону, может приводить к преждевременному истиранию футеровки и прогару холодильников шахты. Поэтому такой режим целесообразно использовать периодически для удаления лишнего гарнисажа на стенках печи. Затем в случае, если в составе шихты используются окатыши различных производителей, в зону рудного гребня необходимо загружать менее прочные окатыши при загрузке более прочных окатышей в периферийную часть колошника. При этом долю агломерата по отношению к окатышам по радиусу печи оставлять на одинаковом уровне. В этом случае отклонение от среднего соотношения их расходов, которое ведет к нарушению заданных параметров продуктов плавки, в частности к отклонению основности шлака, образующегося в локальной зоне, от заданной оптимальной величины для доменной плавки в целом будет минимальным. Загрузка в доменную печь № 6 ПАО «ММК» окатышей ССГПО в зону рудного гребня, соответствующей пониженным температурам и повышенным рудным нагрузкам, при размещении окатышей Михаловского ГОК снижает потери железа с выносимой из доменной печи пылью и шлаком на 1 кг/т чугуна, поскольку такое расположение низкопрочных окатышей, во-первых, снижает разрушение их у поверхности слоя шихты в печи, во-вторых, переносит место разрушения в область шахты с большим сечением по сравнению с колошником.

## 5.5 Температура железорудного сырья и стабильность ее величины

В условиях работы доменной печи с верхней лимитирующей по газодинамике зоной необходимо контролировать температуру загружаемого в колошниковое пространство печи агломерата.

Увеличение температуры шихты на  $10^{\circ}\text{C}$  повышает температуру колошникового газа на  $8,5^{\circ}\text{C}$  в соответствии с формулой:

$$t_{\text{кг}} = t_0 (1 - W_{\text{ш}} / W_{\text{г}}) + (W_{\text{ш}} / W_{\text{г}}) (\Delta + t_{\text{ш}}^0), \quad (5.1)$$

где  $t_{\text{ш}}^0$  – средняя начальная температуры шихты (по расчёту).

Рост температуры колошникового газа обеспечивает увеличение скорости колошникового газа на 1,9% в соответствии с зависимостью (5.2) и повышение динамического напора газа на 5,9% по формуле (5.3).

$$g_{\text{кг}} = \frac{V_{\text{кг(вл)}} \cdot \Pi \cdot (t_{\text{кг}} + 273)}{S_{\text{к}} \cdot 273 \cdot (P_{\text{кг}} + 1)}, \quad (5.2)$$

где  $V_{\text{кг(вл)}}$  – выход колошникового газа;

$\Pi$  – производительность печи;

$t_{\text{кг}}$  – температура колошникового газа;

$S_{\text{к}}$  – площадь сечения колошника;

$P_{\text{кг}}$  – давление колошникового газа.

$$h_{\text{д}} = \frac{g_0^2 \rho T P_0}{2gPT_0}, \quad (5.3)$$

где  $g_0$  – скорость газа в исходном состоянии;

$P$  – давление газа;

$T$  – температура газа.

В условиях работы печи с верхней определяющей зоной по силовому взаимодействию потоков шихты и газа это может сопровождаться неровным сходом шихтовых материалов, подстоями и подвисанием шихты.

При доле окатышей, равной 35% от железорудной части шихты, росту температуры шихты на  $10^{\circ}\text{C}$  может предшествовать увеличение температуры агломерата на  $15-20^{\circ}\text{C}$ . Для устранения негативного воздействия повышения температуры шихты на газодинамику верха печи необходимо расход дутья сократить на 2,2% ( $60-70 \text{ м}^3/\text{мин}$ ), что будет сопровождаться уменьшением производительности печи.

Не менее важное значение имеет стабильность температуры шихтовых материалов, загружаемых в колошниковое пространство печи. Кроме того, наряду с равномерностью распределения шихтовых материалов по виду и крупности целесообразно обеспечивать равномерное окружное распределение железорудных материалов по их температуре.

В связи с этим шесть парными периодами на доменной печи № 6 ПАО «ММК» исследовали влияние температуры агломерата и стабильность ее величины на газодинамику в верхней части печи и показатели ее работы. Длительность каждого периода составляла 7-8 сут. Разработали режим загрузки железорудных материалов в колошниковое пространство печи с различной температурой.

В трех парных периодах, усредненных соответственно в периоды I и II, температура агломерата в среднем изменялась с  $25,5$  до  $5,5^{\circ}\text{C}$ . Другие три пары смежных периодов усреднили в периоды III и IV. В опытном периоде (IV) по сравнению с базовым (III) уменьшили величину стандартного отклонения температуры агломерата с 19 до 5 при сохранении температуры агломерата на уровне  $25-26^{\circ}\text{C}$  (таблица 5.31).

В результате в периоде II по сравнению с периодом I уменьшилась температура колошникового газа с  $149,3$  до  $142,1^{\circ}\text{C}$ , снизилась скорость колошникового газа с  $1,472$  до  $1,446 \text{ м/с}$  при уменьшении динамического напора газа на колошнике с  $0,91$  до  $0,85 \text{ Н/м}^2$ . Замедление продвижения газа через слой шихты в верхней части печи сопровождалось повышением степени использования  $\text{CO}$  с  $41,6$  до  $42,7\%$ . Повышение химической степени использования газа сопровождалось уменьшением удельного расхода кокса с  $443,6$  до  $442,5 \text{ кг/т}$  чугуна.



колошникового и фурменного газов (таблица 5.32). Степень использования CO и H<sub>2</sub> выросла соответственно на 1,2 и 0,4% абс. В результате уменьшился удельный расход кокса с 435,8 до 431,9 кг/т чугуна в опытном периоде по сравнению с базовым.

Таблица 5.32 – Показатели газодинамического режима работы печи

Наименование показателей	Номер периода			
	I	II	III	IV
Коэффициент сопротивления шихты движению газов: на колошнике в горне	0,15	0,13	0,10	0,11
	8,5	8,4	8,4	8,5
Выход фурменного газа, м <sup>3</sup> /мин	3829	3837	3799	3815
Выход колошникового газа, м <sup>3</sup> /мин	3377	3378	3229	3307
Скорость колошникового газа, м/с	1,472	1,446	1,417	1,464
Динамический напор газа на колошнике, Н/м <sup>2</sup>	0,91	0,86	0,83	0,91

Для устранения негативного влияния колебания температур агломерата необходимо определять температуру агломерата в каждом из бункеров. После чего агломерат с наименьшей долей по температуре необходимо загружать в слой агломерата с наибольшей долей по температуре. Такая загрузка по результатам физического моделирования обеспечит наиболее эффективное его перемешивание и, следовательно, снизит колебание температуры по окружности колошника.

### Выводы по главе 5

1. Разработаны рациональные параметры режимов загрузки компонентов шихты в колошниковое пространство печей, работающих с верхней лимитирующей зоной по силовому взаимодействию потоков шихты и газа. На газодинамику верха положительное влияние оказывала загрузка коксового орешка в зону рудного гребня по разработанному режиму с показателем равномерности поступления его из бункера БЗУ, равным 0,72-0,74. Равномерное распределение кокса фракции 10-25 мм по окружности доменных

печей № 4, 6, 9 ПАО «ММК» в количестве 11,6 кг/т чугуна сопровождалось снижением коэффициента сопротивления шихты движению газового потока в верхней части печи на 7,1%, увеличением интенсивности теплообмена в зоне с температурами менее 850<sup>0</sup>С на 2,3%. Рациональное распределение коксового орешка в колошниковом пространстве печи создавало благоприятные условия для снижения расхода кокса повышением расхода природного газа. На каждые 10 кг/т чугуна коксового орешка увеличение расхода газа на 400 м<sup>3</sup>/ч осуществляли без осложнения газодинамического режима работы печи. В исследуемых периодах удельный расход кокса уменьшился на 9,4 кг/т чугуна.

2. Преимущества используемого коксового орешка в составе шихты доменных печей ПАО «ММК» по сравнению со скиповым коксом заключались в следующем: кокс класса 10-25 мм обладает более высокой холодной прочностью, повышенной реакционной способностью. Согласно лабораторным исследованиям структурная прочность скипового кокса составляет 78,9% против 85,9% у коксового орешка. Реакционная способность фракции 10-25 мм выше, чем у кокса класса +40 мм на 2,6 % отн.

3. Разработана и внедрена в ПАО «ММК» технология загрузки шихтовых материалов в зависимости от их горячей прочности. Железорудные материалы, обладающие пониженной горячей прочностью целесообразно загружать в зону рудного гребня, то есть на расстояние 2/3 – 3/4 радиуса колошника, соответствующей пониженным температурам и повышенным рудным нагрузкам. На доменных печах № 2, 4 ПАО «ММК», работающих с верхней лимитирующей по газодинамике зоной, увеличение доли материала, обладающего меньшей горячей прочностью вместо компонента шихты с большей прочностью при температуре 600<sup>0</sup>С в зоне рудного гребня с 45 до 70% уменьшило коэффициент сопротивления шихты на 12,1%, за счет снижения разрушения железорудного материала у поверхности слоя шихты в печи, и переноса места разрушения в область шахты с большим сечением по сравнению с колошником. Повышение газопроницаемости шихты позволило увеличить интенсивность хода по дутью на 4,8% без ухудшения работы печи

по газодинамике, уменьшить уровень засыпи с 1,6 до 1,5 м. Эффективная организация доменного процесса путем использования рационального режима загрузки окатышей и агломерата сопровождалось повышением степени использования CO и H<sub>2</sub> соответственно на 1,1 и 2,5 % абс., что позволило уменьшить удельный расход кокса на 3,7 кг/т чугуна.

4. Повышение горячей прочности железорудных материалов положительно действовало на газодинамику верха печи и технико-экономические показатели плавки. В исследуемых периодах увеличение горячей прочности железорудных материалов по LTD(+6,3) на 2,9% сопровождалось снижением коэффициента сопротивления шихты движению газового потока на 5,8%. Это создавало условия для снижения удельного расхода кокса повышением расхода природного газа. На каждый 1% увеличения горячей прочности железорудных материалов обеспечивали рост расхода природного газа в среднем на 137 м<sup>3</sup>/ч без осложнения газодинамического режима работы печи при понижении удельного расхода кокса на 1,23 кг/т чугуна. Основные изменения хода процессов заключались в повышении степени использования водорода на 1,66 % отн., степени восстановления Fe из FeO водородом на 1,91 % отн., соотношения степеней использования H<sub>2</sub> и CO на 1,46 % отн., соотношения теплоёмкостей потоков шихты и газа в нижней части печи на 0,23% при уменьшении в верхней ее части с температурами менее 850<sup>0</sup>C на 0,39%. Снижение суммарного расхода тепла на проведение всех процессов в определяющей его зоне составило 0,85%.

5. Одним из направлений уменьшения взаимного сопротивления потоков шихты и газа в верхней части печи является равномерное распределение агломерата в колошниковом пространстве печи по его температуре. Исследованиями на доменной печи № 6 ПАО «ММК» показано, что уменьшение среднеквадратического отклонения температуры агломерата, загружаемого в печь, от 19,0 до 5,0 сопровождалось повышением расхода природного газа на 500 м<sup>3</sup>/ч. Более равномерное распределение агломерата различной температуры по окружности печи обеспечило снижение

коэффициента окружной неравномерности распределения температур  $p_t$  на 0,05, что привело к увеличению степени использования CO на 2,8% отн. и  $H_2$  на 1,0% отн. и понижению удельного расхода кокса на 3,9 кг/т чугуна. Наиболее эффективное перемешивание агломерата различной температуры, следовательно, снижение колебания температуры по окружности колошника обеспечит загрузка агломерата с наименьшей долей по температуре в слой агломерата с наибольшей долей по температуре.

6. Для уменьшения степени уравнивания шихты в верхней части доменной печи на каждые 5% необходимо снижать заданную температуру производимого агломерата на  $100^{\circ}C$ . В опытных плавках снижение температуры железорудной части шихты на  $16^{\circ}C$  сопровождалось снижением скорости колошникового газа на 1,8%, уменьшением динамического напора газа на 5,5% и коэффициента сопротивления шихты на 13% при сохранении объема выхода колошникового газа.

## **Глава 6 ЛОКАЛЬНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПАРАМЕТРАМИ ЗАГРУЗКИ И ДУТЬЯ НА ХОД ПРОЦЕССОВ В ПЕЧИ ПРИ ОПРЕДЕЛЯЮЩЕЙ РОЛИ ГОРНА**

### **6.1 Разработка и реализация технологии загрузки материалов, обладающих промывочными свойствами, в зону горна печи с наилучшей дренажной способностью**

Удельный расход кокса и производительность доменной печи в значительной степени определяются дренажной способностью коксовой насадки в горне. Вид мероприятий, используемых для улучшения условий фильтрации жидких продуктов плавки через слой кокса, зависит от причины снижения проницаемости коксовой насадки. Причин, затрудняющих процесс дренажа жидких продуктов плавки через слой кокса в горне печи, несколько. Использование в составе шихты повышенного расхода коксового орешка или коксовой фракции, загрузка в доменную печь кокса низкого качества, высокоосновного агломерата. Например, для условий ПАО «ММК» удельный расход кокса мелких классов составляет 10-20 кг/т чугуна, на других предприятиях РФ достигает 30 кг/т чугуна. Горячая прочность кокса по CSR, загружаемого в доменные печи ПАО «ММК», в последние годы находится на уровне ниже 40%, основность агломерата по  $\text{CaO/SiO}_2$  составляет на уровне 1,7-1,8.

Длительное использование такого сырья в составе шихты доменных печей приводит к скоплению тонкодисперсной неплавящейся спели, мелочи кокса и тугоплавких высокоосновных минералов. Постепенное накопление их в горне печи означает загромождение его компонентами, не являющимися чугуном и шлаком. В результате загромождение горна печи приводит к существенному снижению ее производительности (более 500 т/сут), по сравнению с нормальной ее работой, и к повышению удельного расхода кокса (более 15 кг/т чугуна).

В связи с этим необходимо предупреждать загромождение горна неплавкими массами путем оперативного устранения причины ухудшения дренажной способности горна. Для этого целесообразно использовать в составе шихты промывочные материалы [497]. Это усложняет управление распределением в колошниковом пространстве печи. Особенно это проявляется на доменных печах, оснащенных компактным БЗУ лоткового типа. Неравномерное их распределение будет сопровождаться различием химического состава жидких продуктов плавки и чугуна по окружности горна печи. Нерациональное распределение по радиусу колошника не обеспечит поступление промывочного материала в локальную зону с наихудшей дренажной способностью горна печи. В результате использование промывочных материалов не обеспечивает оптимальной работы печи по производительности и удельному расходу кокса.

Разработали и внедрили в ПАО «ММК» рациональную технологию загрузки промывочных материалов, обеспечивающих локальную очистку горна от спели, мелочи кокса и тугоплавких минералов [498, 499].

Для этого на доменных печах № 2 и 6 ПАО «ММК» исследованием 37 смежных пар периодов длительностью по 7-9 сут оценили изменение фильтрующей способности коксовой насадки в горне и показатели их работы при различных режимах загрузки промывочных материалов в локальные зоны горизонтального сечения колошника. Загрузку марганцевой, комплексной кремниеземо-марганцовистой руд, конвертерного шлака осуществляли на периферию, в зону рудного гребня, к осевой зоне, в промежуточные зоны колошника и равномерно по радиусу.

Смена режимов загрузки промывочных материалов осуществляли в условиях изменения показателей качества кокса в горячем состоянии. В исследуемых периодах величина горячая прочность по CSR изменялась в интервале 30,0-44,8 % при варьировании реакционной способности кокса по CRI 41,9-34,7%.

На доменной печи № 6 исследовали 25 периодов, отличающиеся вариантами загрузки марганцевой руды в колошниковое пространство печи:

– без использования марганцевой руды и загрузкой ее в зону рудного гребня;

– без использования марганцевой руды и загрузкой ее к центру печи;

– загрузка марганцевой руды в среду агломерата и зону рудного гребня;

– перемещение марганцевой руды из зоны рудного гребня к периферии;

– перемещение марганцевой руды из периферийной части печи в зону рудного гребня;

– перемещение марганцевой руды из центральной части печи в зону рудного гребня;

– загрузка марганцевой руды к периферии и прекращением промывочного периода;

– загрузка марганцевой руды в зону рудного гребня и прекращение промывочного периода.

Загрузку марганцевой руды на периферию осуществляли со станций углового положения лотка матрицы загрузки № 10-8. В зону рудного гребня промывочный материал выгружали в смеси с железорудным сырьем со станций № 7-5 и отдельным скипом со станций № 6-7. В центральную часть печи марганцевую руду выгружали отдельным скипом со станций углового положения лотка № 5-4. Физическим моделированием оценили распределение марганцевой руды по станциям углового положения лотка в исследуемые периоды. Результаты представлены в таблице 6.1.

Результаты исследований на доменной печи № 6 в усредненных периодах представлены в таблицах 6.2-6.7. Растворимость углерода в чугуне оценили по отношению количества фактического углерода в жидком чугуне к его количеству в насыщенном жидком чугуне:

$$P_{[C]} = \frac{C_{\text{нас}}}{C_{\text{факт}}}, \quad (6.1)$$

где  $C_{\text{факт}}$  – количество фактического углерода в жидком чугуна;

$C_{\text{нас}}$  – количество углерода в насыщенном жидком чугуна.

$$C_{\text{нас}} = 1,34 + 2,54 \cdot 10^{-3} \cdot T - 0,3 \cdot [\text{Si}] - 0,35 \cdot [\text{P}] - 0,2 \cdot [\text{S}] + 0,027 \cdot [\text{Mn}].$$

Индекс DMI оценили по следующей зависимости [500]:

$$\text{DMI} = \frac{C_{\text{нас}} - C_{\text{факт}}}{2,57 \cdot 10^{-3}} + T - 1430 + 190 \cdot \left(1,23 - \left(\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}\right)\right), \quad (6.2)$$

где  $C_{\text{нас}}$  – количество углерода в насыщенном жидком чугуна;

$C_{\text{факт}}$  – количество фактического углерода в жидком чугуна;

$T$  – температура чугуна, °C;

CaO/SiO<sub>2</sub> – основность шлака.

Таблица 6.1 – Распределение марганцевой руды по станциям углового положения лотка в исследуемые периоды

Выгрузка марганцевой руды в локальные зоны горизонтального сечения колошника	Доля марганцевой руды (%) поступающей со станции углового положения лотка							
	11	10	9	8	7	6	5	4
В зону рудного гребня					22	47	31	
В зону рудного гребня (отдельным скипом)					50	50		
К периферии		22	47	31				
В среду агломерата		11	24	16	7	19	18	5
К центру печи							50	50

Остальные показатели дренажной способности коксовой насадки в горне печи – количество шлака, остающегося в горне после выпуска, расчетная вязкость шлака по степени приближения фактического коэффициента распределения серы между чугуном и шлаком к равновесной величине оценили в соответствии с формулами (3.7)-(3.15).

По результатам исследований установили целесообразность использования локального режима загрузки промывочных материалов в колошниковое пространство печей. В опытных плавках локальная загрузка

марганцевой руды в зону рудного гребня доменной печи № 6 по сравнению с равномерным ее распределением по радиусу в слое агломерата в количестве 34,9-39,7 кг/т чугуна (сравнение периодов I и II, таблицы 6.2-6.5) сопровождалась снижением вязкости шлака от 0,50 до 0,47 Па·с, уменьшением количества шлака, остающегося в горне печи после выпуска от 23,4 до 19,5 т, снижением растворимости углерода в чугуне от 94,8 до 93,4%. Производительность печи повысилась от 3323 до 3353 т/сут.

Загрузка марганцевой руды к осевой зоне доменной печи № 6 со станций углового положения лотка БЗУ № 5-4 в количестве 40,6 кг/т чугуна при снижении горячей прочности кокса от 35,4 до 33,2% в периоде IV по сравнению с периодом III сопровождалась улучшением дренажной способности коксовой насадки. Уменьшилась растворимость углерода в чугуне от 95,5 до 95,2%. Снизилось среднеквадратическое отклонение количества шлака, выпускаемого из леток, от 1,28 до 1,08 ковшей. Компенсирование отрицательного влияния ухудшения горячей прочности кокса локальной загрузкой марганцевой руды к центру печи позволило повысить производительность печи от 3227 до 3338 т/сут.

Загрузка марганцевой руды в зону рудного гребня в периоде VI со станций углового положения лотка БЗУ № 7-5 в количестве 28,3 кг/т чугуна при снижении горячей прочности кокса от 38,3 до 37,4 % в периоде IV по сравнению с периодом V сопровождалась улучшением дренажной способности коксовой насадки. Уменьшилось количество шлака, остающегося в горне печи после выпуска от 19,1 до 17,6 т. Снизилась вязкость шлака от 0,57 до 0,51 Па·с. В результате производительность печи увеличилась от 3450 до 3470 т/сут.

В условиях увеличения горячей прочности кокса от 39,1 до 41,3% в периоде VIII по сравнению с периодом VII перемещение марганцевой руды в количестве 36,5 кг/т чугуна из зоны рудного гребня к периферии доменной печи № 6 сопровождалось ухудшением дренажной способности коксовой насадки по ряду основных показателей для определяющей зоны. Увеличилась вязкость шлака от 0,51 до 0,58 Па·с, количество шлака, остающегося в горне

печи после выпуска от 16,6 до 21,3 т. В результате уменьшилась производительность печи от 3481 до 3439 т/сут.

Таблица 6.2 – Основные технологические показатели работы доменной печи № 6 ПАО «ММК» в периоды I-VI

Наименование показателей	Номер периода					
	I	II	III	IV	V	VI
Станции углового положения лотка матрицы, с которых загружали конвертерный шлак	10-4	7-5	-	5-4	-	7-5
Количество суток	6	6	5	7	7	8
Удельный расход кокса сухого, скипового), кг/т чугуна:						
фактический	419,0	419,6	425,6	436,5	427,8	432,9
приведенный	-	411,7	-	424,7	-	425,7
Производительность, т/сут:						
по фактическому количеству загруженных подач	3323	3499	3227	3407	3450	3498
приведенная	-	3353	-	3338	-	3470
Расход, кг/т чугуна:						
сырьевых материалов	1709	1707	1684	1725	1688	1704
в том числе марганцевой руды	39,7	34,9	-	40,6	-	28,3
Доля окатышей от ЖРС, %	31,5	33,4	31,2	31,9	32,5	32,4
Содержание Fe в шихте, %	56,8	56,9	57,7	56,3	57,5	57,0
Рудная нагрузка, т/т	3,85	3,84	3,799	3,861	4,019	3,933
Содержание O <sub>2</sub> в дутье, %	25,6	26,7	26,1	28,2	27,3	27,7
Расход, м <sup>3</sup> /т чугуна: дутья	1226	1139	1277	1199	1198	1173
природного газа	141,2	133,0	146,2	140,1	142,4	137,5
Горячая прочность кокса по CSR, %	39,0	36,2	35,4	33,2	38,3	34,4
Реакционная способность по CRI, %	39,6	39,1	39,6	40,2	40,6	40,6
Выход шлака, кг/т чугуна	358	359	354	355	351	365
Интенсивность хода	2,065	2,020	2,089	2,071	2,090	2,080
по дутью, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> минуту						
по суммарному углероду, т/м <sup>3</sup> сутки	1,063	1,090	1,049	1,136	1,051	1,080
Содержание в чугуне, %:						
Si	0,79	0,71	0,77	0,73	0,71	0,72
Mn	0,58	0,54	0,25	0,58	0,22	0,47
S	0,017	0,017	0,013	0,018	0,019	0,018
C	4,61	4,56	4,66	4,64	4,65	4,63
Содержание в шлаке, %:						
SiO <sub>2</sub>	39,99	39,95	39,76	39,83	39,03	38,90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,57	9,32	10,00	9,88	10,13	10,46
CaO	39,12	39,27	39,24	39,20	39,42	38,88
MgO	8,12	8,16	7,88	7,30	7,52	7,67
S	0,68	0,66	0,66	0,68	0,69	0,71

Таблица 6.3 – Основные технологические показатели работы доменной печи

## № 6 ПАО «ММК» в периоды VII-XIV

Наименование показателей	Номер периода							
	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV
Станции углового положения лотка матрицы, с которых загружали конвертерный шлак	7-5	10-8	10-8	7-5	7-5	10-8	5-4	7-6
Количество суток	8	7	8	6	5	5	7	7
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна:								
фактический	426,0	433,2	431,2	438,3	443,7	438,4	436,5	437,4
приведенный	-	432,9	-	429,3	-	436,4	-	442,3
Производительность, т/сут:								
по фактическому количеству загруженных подач	3481	3497	3349	3374	3351	3356	3407	3398
приведенная	-	3439	-	3401	-	3391	-	3400
Расход, кг/т чугуна:								
сырьевых материалов	1681	1677	1687	1690	1704	1701	1725	1723
в том числе марганцевой руды	21,4	23,2	31,8	27,0	34,8	34,6	40,6	36,9
Доля окатышей от ЖРС, %	34,5	36,5	33,9	33,8	31,2	29,5	31,9	31,9
Содержание Fe в шихте, %	57,8	57,9	57,5	57,5	57,0	57,1	56,3	56,3
Рудная нагрузка, т/т	3,947	3,884	3,913	3,868	3,840	3,881	3,951	3,940
Содержание O <sub>2</sub> в дутье, %	28,3	28,3	27,2	27,3	26,9	27,0	28,2	27,6
Расход, м <sup>3</sup> /т чугуна:								
дутья	1167	1161	1226	1217	1241	1238	1199	1203
природного газа	144,2	140,3	142,9	142,3	136,9	138,5	140,1	137,5
Горячая прочность кокса по CSR, %								
Реакционная способность по CRI, %	39,1	41,3	40,8	40,4	36,3	33,4	33,2	30,0
Выход шлака, кг/т чугуна	342	340	341	344	359	353	355	370
Интенсивность хода по дутью, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> минуту	2,058	2,060	1,746	2,075	2,104	1,598	2,071	2,072
по суммарному углероду, т/м <sup>3</sup> сут	1,112	1,133	1,092	1,109	1,031	1,019	1,136	1,134
Содержание в чугуне, %:								
Si	0,71	0,65	0,70	0,71	0,73	0,74	0,73	0,71
Mn	0,40	0,42	0,51	0,48	0,51	0,55	0,58	0,56
S	0,020	0,022	0,020	0,019	0,020	0,018	0,018	0,016
C	4,62	4,59	4,63	4,66	4,65	4,64	4,64	4,66
Содержание в шлаке, %:								
SiO <sub>2</sub>	38,17	38,14	38,62	38,64	39,42	38,90	39,83	39,41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,23	11,35	10,99	10,79	10,28	10,33	9,88	9,84
CaO	37,89	37,67	37,57	38,03	38,23	38,30	39,20	39,69
MgO	7,82	7,77	8,05	8,08	8,04	8,08	7,30	7,33
S	0,71	0,70	0,67	0,68	0,68	0,67	0,68	0,68

Таблица 6.4 – Показатели дренажной способности коксовой насадки в горне печи № 6 в периоды I-VI

Наименование показателей	Номер периода					
	I	II	III	IV	V	VI
Расчетная вязкость шлака по степени приближения фактического коэффициента распределения серы между чугуном и шлаком к равновесной величине, Па·с	0,50	0,47	0,42	0,54	0,57	0,51
Количество шлака, остающегося в горне после выпуска, тонны	23,4	19,5	20,0	19,8	19,1	17,6
Растворимость углерода в чугуне, %	94,8	93,4	95,5	95,2	95,4	94,7
Индекс DMI	198	224	192	189	181	197
Градиент температур охлаждающей воды холодильников горна, °С	1,04	1,04	1,03	1,05	1,10	1,10
Среднеквадратическое отклонение ковшей шлака между летками 1 и 2	0,83	1,26	1,28	1,08	1,06	0,96

Таблица 6.5 – Показатели дренажной способности коксовой насадки в горне печи № 6 в периоды VII-XIV

Наименование показателей	Номер периода							
	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV
Расчетная вязкость шлака по степени приближения фактического коэффициента распределения серы между чугуном и шлаком к равновесной величине, Па·с	0,51	0,58	0,60	0,57	0,57	0,57	0,54	0,53
Количество шлака, остающегося в горне после выпуска, т	16,6	21,3	21,0	17,8	18,2	21,8	19,8	17,0
Растворимость углерода в чугуне, %	94,6	93,8	94,7	95,4	95,2	95,1	95,2	95,6
Индекс DMI	202	215	201	188	191	195	189	184
Градиент температур охлаждающей воды холодильников горна, °С	1,11	1,08	1,11	1,09	1,09	1,09	1,05	1,09
Среднеквадратическое отклонение ковшей шлака между летками 1 и 2	1,26	0,94	1,75	1,04	0,96	1,32	1,08	1,06

При горячей прочности кокса на уровне 40,4-40,8 % перемещение марганцевой руды в периоде X по сравнению с периодом IX из периферии доменной печи № 6 в зону рудного гребня в количестве 33,8 кг/т чугуна сопровождалось улучшением дренажной способности кокса в определяющей зоне – с повышенной рудной нагрузкой. Уменьшились расчетная вязкость шлака от 0,60 до 0,57 Па·с и его количество, остающегося в горне печи после выпуска жидких продуктов плавки, от 21,0 до 17,8 т. Рациональное использование преимуществ локальной загрузки марганцевой руды в зону рудного гребня позволило увеличить производительность печи от 3349 до 3401 т/сут.

В условиях уменьшения горячей прочности кокса от 36,3 до 33,4 % в периоде XII по сравнению с периодом XI перемещение марганцевой руды в количестве 30,3 кг/т чугуна из зоны рудного гребня к периферии доменной печи № 6 сопровождалось улучшением дренажа продуктов плавки в горне печи. Индекс DMI увеличился от 191 до 195, растворимость углерода в чугуне уменьшилась от 85,2 до 95,1 %. Улучшение условий дренажа обеспечило повышение производительности от 3351 до 3391 т/сут.

При снижении горячей прочности кокса от 33,2 до 30,0% в период XIV по сравнению с периодом XIII перемещение марганцевой руды в количестве 37-41 кг/т чугуна из осевой зоны печи № 6 в зону рудного гребня приводило к ухудшению дренажной способности коксовой насадки в центральной части печи и улучшению в зоне рудного гребня. Растворимость углерода в чугуне увеличилась от 95,2 до 95,6%, при уменьшении индекса DMI от 189 до 184 и сохранении производительности печи. При этом расчетная вязкость шлака и количество шлака, остающегося в горне печи после выпуска уменьшились соответственно с 0,54 до 0,53 Па·с и 19,8 до 17,0 т. В результате наблюдали увеличение удельного расхода кокса с 436,5 до 442,3 кг/т чугуна при сохранении производительности печи на 3410 т/сут.

На доменной печи № 2 исследовали 12 периодов, отличающихся вариантами загрузки конвертерного шлака в колошниковое пространство печи. Его загружали в зону рудного гребня; в промежуточную зону между периферией и рудным гребнем; к периферии; к осевой зоне печи; в среду агломерата.

В результате исследовали изменение показателей работы печи в смежных периодах по вариантам:

- загрузка конвертерного шлака в среду агломерата и к периферии;
- загрузка конвертерного шлака к периферии и промежуточную зону между рудным гребнем и периферией;
- загрузка конвертерного шлака к периферии и к центру печи;
- загрузка конвертерного шлака к периферии с последующим увеличением его расхода;
- загрузка конвертерного шлака в промежуточную зону между рудным гребнем и центром с последующим увеличением его расхода;
- загрузка конвертерного шлака в промежуточную зону между рудным гребнем и периферией с последующим увеличением его расхода.

Загрузку конвертерного шлака в различные зоны колошника по радиусу печи обеспечивали заданным расположением их в скипе и, соответственно, в бункере бесконусного загрузочного устройства лоткового типа, в зависимости от станций углового положения лотка, с которых производилась выгрузка их в печь. В исследуемые периоды таковыми являлись станции № 10-4; 10-7; 10-9; 8-7; 8-4. Результаты исследований на доменной печи № 2 в усредненных периодах представлены в таблицах 6.6-6.9.

Перемещение конвертерного шлака в количестве 47,7 кг/т чугуна с периферии (период IXX) в промежуточную зону между периферией и зоной рудного гребня при горячей прочности кокса 43,8% (период XX) улучшало дренажную способность коксовой насадки. Уменьшилась вязкость шлака от 0,50 до 0,31 Па·с при сохранении производительности печи. Обратное

перемещение конвертерного шлака на периферию при понижении его расхода от 47,7 до 38,1 кг/т чугуна в периоде XXII по сравнению с периодом XXI сопровождалось ухудшением дренажной способности коксовой насадки. Увеличилась вязкость шлака от 0,37 до 0,54 Па·с, его количество, остающееся после выпуска жидких продуктов плавки от 11,3 до 12,3 т, растворимость углерода в чугуне от 95,1 до 96,0% при уменьшении индекса DMI от 190 до 174. В результате производительность печи уменьшилась от 3267 до 3171 т/сут.

Наряду с качеством кокса рациональное размещение конвертерного шлака в колошниковом пространстве доменной печи № 2 существенно зависело от состояния футеровки. Наличие настыли в нижней части шахты лимитировало интенсификацию процесса производства чугуна. Перемещение конвертерного шлака к периферии из различных зон – промежуточная между периферией и рудным гребнем, рудный гребень, центр и равномерное распределение его по радиусу печи (сравнение периодов XV-XXII) позволяло увеличить интенсивность по фурменному газу в среднем на 47 м<sup>3</sup>/мин преимущественно за счет повышения расхода дутья.

В опытных плавках перемещение конвертерного шлака из периферии в зону, соответствующую рудному гребню и центральной части печи (сравнение периодов XXIII-XXIV), привело к снижению производительности от 3069 до 3017 т/сут. Перемещение конвертерного шлака обратно к периферии в периоде XXVI по сравнению с периодом XXV позволило увеличить производительность печи от 3064 до 3174 т/сут.

Таким образом, рациональный режим загрузки промывочных материалов зависел от горячей прочности кокса по CSR. Загружать промывочные материалы к осевой зоне целесообразно при работе на коксе с горячей прочностью по CSR менее 35 %. При величине горячей прочности кокса более 40% предпочтительно промывочные материалы (кремнеземо-марганцовистую руду, конвертерный шлак) загружать в зону рудного гребня.

Таблица 6.6 – Основные технологические показатели работы  
доменной печи № 2 ПАО «ММК» в периоды IXX-XXIV

Наименование показателей	Номер периода					
	XV	XVI	XVII	XVIII	IXX	XX
Станции углового положения лотка матрицы, с которых загружали конвертерный шлак	4-10	9-10	9-10	7-10	9-10	7-8
Удельный расход кокса сухого, скипового), кг/т чугуна:						
фактический	419,2	419,9	416,3	417,1	419,2	400,2
приведенный	-	411,5	424,7	417,3	415,2	414,4
к периоду №		к п. IXX	к п. XX	к п. XXI	к п. XXII	к п. XXIII
Производительность, т/сут:						
по фактическому количеству загруженных подач	3108	3122	3262	3246	3301	3309
приведенная	-	3145	3218	3252	3298	3235
к периоду №		к п. IXX	к п. XX	к п. XXI	к п. XXII	к п. XXIII
Расход, кг/т чугуна:						
сырьевых материалов	1675	1668	1671	1673	1674	1685
в том числе кварцита	12,2	43,9	12,5	18,3	13,1	17,1
конвертерного шлака	40,7	41,5	55,5	58,7	48,1	47,7
Доля окатышей от ЖРС, %	47,2	47,3	51,6	54,6	52,6	54,5
Содержание Fe в шихте, %	57,96	58,20	58,10	58,03	57,97	57,64
Рудная нагрузка, т/т	3,699	3,694	3,986	3,967	3,964	4,165
Содержание O <sub>2</sub> в дутье, %	25,82	26,17	26,24	26,28	26,62	27,96
Расход, м <sup>3</sup> /т чугуна: дутья	1400	1494	1404	1411	1396	1333
природного газа	134,5	129,6	136,8	137,7	135,6	160,9
Горячая прочность кокса по CSR, %	42,4	42,8	44,8	43,3	43,6	43,8
Реакционная способность по CRI, %	35,8	35,2	34,9	37,2	34,9	36,4
Интенсивность хода:						
по дутью, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> минуту	2,206	2,225	2,322	2,322	2,337	2,235
по суммарному углероду, т/м <sup>3</sup> сутки	0,796	0,801	0,832	0,833	0,847	0,811
Содержание в чугуне, %:						
Si	0,67	0,75	0,70	0,76	0,76	0,83
Mn	0,31	0,31	0,32	0,34	0,30	0,27
S	0,019	0,017	0,018	0,017	0,019	0,020
C	4,67	4,73	4,72	4,75	4,77	4,62
Содержание в шлаке, %:						
SiO <sub>2</sub>	37,1	36,7	36,7	36,9	36,9	37,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,4	12,5	12,8	12,3	12,7	12,3
CaO	35,9	35,9	35,4	36,1	35,8	36,2
MgO	10,0	10,1	10,6	10,2	10,0	9,44
S	0,60	0,61	0,61	0,63	0,65	0,67

Таблица 6.7 – Основные технологические показатели работы  
доменной печи № 2 ПАО «ММК» в периоды XXV-XXX

Наименование показателей	Номер периода					
	XXI	XXII	XXIII	XXIV	XXV	XXVI
Станции углового положения лотка матрицы, с которых загружали конвертерный шлак	7-8	9-10	9-10	4-8	4-8	9-10
Удельный расход кокса сухого, скипового), кг/т чугуна: фактический приведенный к периоду №	414,6	425,5	440,7	434,4	432,6	432,3
	409,4 к п. XXIV	422,8 к п. XXV	434,8 к п. XXVI	430,0 к п. XXVII	429,6 к п. XXVIII	430,7 к п. XXX
Производительность, т/сутки: по фактическому количеству загруженных подач приведенная к периоду №	3267	3107	3069	3017	3064	3188
	3219 к п. XXIV	3171 к п. XXV	3113 к п. XXVI	3017 к п. XXVII	3102 к п. XXVIII	3174 к п. XXX
Расход, кг/т чугуна: сырьевых материалов в том числе кварцита конвертерного шлака	1680	1682	1682	1685	1674	1666
	14,6	7,9	7,9	8,7	6,1	5,5
	38,1	51,6	35,8	30,3	41,3	60,6
Доля окатышей от ЖРС, %	56,6	46,8	50,2	50,3	52,7	56,1
Содержание Fe в шихте, %	57,81	57,68	57,74	57,64	58,00	58,28
Рудная нагрузка, т/т	4,019	3,933	3,799	3,861	3,85	3,84
Содержание O <sub>2</sub> в дутье, %	28,49	27,27	26,59	26,98	26,62	27,96
Расход, м <sup>3</sup> /т чугуна: дутья природного газа	1355	1428	1458	1439	1417	1392
	153,8	139,2	130,1	131,4	127,2	132,2
Горячая прочность кокса по CSR, %	43,8	41,8	43,9	43,2	42,2	42,0
Реакционная способность по CRI, %	34,7	35,3	37,8	38,5	35,5	41,9
Интенсивность хода: по дутью, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> ·мин по суммарному углероду, т/м <sup>3</sup> ·сут	2,245	2,252	2,269	2,201	2,200	2,249
	0,831	0,811	0,824	0,799	0,814	0,847
Содержание в чугуне, %: Si Mn S C	0,73	0,70	0,75	0,83	0,73	0,79
	0,26	0,31	0,29	0,28	0,28	0,32
	0,021	0,021	0,021	0,020	0,022	0,022
	4,63	4,68	4,69	4,65	4,68	4,63
Содержание в шлаке, %: SiO <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> CaO MgO S	36,7	37,2	37,2	37,0	36,9	36,1
	12,5	12,5	12,4	12,5	12,5	13,4
	36,5	36,4	37,1	36,5	36,6	35,3
	9,4	9,2	8,9	8,9	9,0	9,7
	0,74	0,65	0,69	0,69	0,71	0,69

Таблица 6.8 – Показатели дренажной способности коксовой насадки в горне печи № 2 в периоды IXX-XXIV

Наименование показателей	Номер периода					
	XV	XVI	XVII	XVIII	IXX	XX
Количество суток	8	7	7	7	7	6
Расчетная вязкость шлака по степени приближения фактического коэффициента распределения серы между чугуном и шлаком к равновесной величине, Па·с	0,61	0,50	0,60	0,46	0,50	0,31
Количество шлака, остающегося в горне после выпуска, т	17,4	14,7	7,1	10,6	9,9	12,1
Растворимость углерода в чугуне, %	97,0	96,0	96,8	97,6	95,2	95,9
Индекс DMI	182	154	164	149	190	178
Градиент температур охлаждающей воды холодильников горна, °С	1,86	1,77	1,74	2,06	1,79	2,0

Таблица 6.9 – Показатели дренажной способности коксовой насадки в горне печи № 2 в периоды XXV-XXX

Наименование показателей	Номер периода					
	XV	XVI	XVII	XVIII	IXX	XX
Количество суток	7	7	7	8	5	5
Расчетная вязкость шлака по степени приближения фактического коэффициента распределения серы между чугуном и шлаком к равновесной величине, Па·с	0,37	0,54	0,63	0,58	0,48	0,66
Количество шлака, остающегося в горне после выпуска, т	11,3	12,3	10,2	10,9	9,1	10,9
Растворимость углерода в чугуне, %	95,1	96,0	96,5	96,7	96,0	95,7
Индекс DMI	190	174	162	175	168	180
Градиент температур охлаждающей воды холодильников горна, °С	2,14	2,06	1,91	2,16	1,65	1,95

Загрузка материалов к осевой зоне печей в количестве 30-40 кг/т чугуна обеспечивало очистку её от спели и мелочи кокса, что улучшало условия дренажа жидких продуктов плавки в горн. Загрузка промывочных материалов в зону рудного гребня в количестве 20-45 кг/т чугуна освобождало ее от высокоосновных тугоплавких составляющих ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ,  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), что улучшало условия для движения продуктов плавки, поступавших в горн, к выпускным леткам [498, 499].

## **6.2 Совместная загрузка кокса мелких классов с материалами, улучшающими дренажную способность кокса в горне**

Пониженная крупность кокса мелких классов по сравнению со скиповым коксом может приводить к ухудшению фильтрующей способности кокса в горне печи. В условиях ПАО «ММК» снижение дренажной способности кокса в горне печи проявлялось при загрузке коксового орешка свыше 12,8 кг/т чугуна [501]. Использование его в таком количестве на доменной печи № 6 ПАО «ММК» без применения компенсирующих мероприятий уменьшило отношение длительности срабатывания одинаковой порции шихты в первой половине межвыпускного периода ко второй ( $\Delta\tau_{\text{н}}/\Delta\tau_{\text{к}}$ ) от 0,931 до 0,925. Увеличилось количество остающегося в печи шлака после выпуска от 13,2 до 16,8 т. Загрузка коксового орешка в доменную печь № 4 ПАО «ММК» в количестве 22,6 кг/т чугуна без использования компенсирующих мероприятий уменьшало  $\Delta\tau_{\text{н}}/\Delta\tau_{\text{к}}$  от 0,958 до 0,937. Увеличилось количество остающегося в печи шлака после выпуска от 20,4 до 25,2 т. Осложнение фильтрации чугуна и шлака через слой кокса в горне доменных печей № 4 и 6 сопровождалось их работой с пониженным коэффициентом замены кокса коксовым орешком, равным 0,61 кг/кг.

В связи с этим на доменных печах ПАО «ММК» провели исследования, направленные на улучшение дренажной способности коксовой насадки в условиях повышенного расхода кокса мелких классов [502-505].

Одним из направлений является загрузка промывочных материалов совместно с коксом мелких классов [503]. При использовании в составе шихты кокса мелких классов в количестве, превышающем 12-13 кг/т чугуна, локальная зона с наихудшей дренажной способностью кокса в горне печи будет соответствовать локальной зоне горизонтального сечения колошника, куда осуществляется загрузка кокса мелких классов. В связи с этим для эффективного устранения негативного влияния расхода коксового орешка необходимо в колошниковом пространстве печи располагать коксовый орешек и марганцевую руду рядом друг с другом. Согласно физическому и математическому моделированию (см. главу 2) для эффективного перемешивания промывочного материала с коксовым орешком при совместной выгрузке их в зону колошника, в бункере БЗУ компоненты шихты необходимо располагать следующим образом: при односкиповой загрузке – в нижнюю часть бункера под коксовым орешком и промывочным материалом располагать 50 % железорудных материалов от общей их массы и 50 % над ними, а при двухскиповой загрузке в нижнюю часть бункера под коксовым орешком и промывочным материалом размещать 40 % железорудных материалов от общей их массы и 60 % – над ними. При этом в бункере БЗУ марганцевую руду необходимо размещать над коксовым орешком.

На доменной печи № 6 «ПАО» ММК исследовали 4 пары смежных периодов. В исследуемых периодах удельный расход кокса мелких классов составлял 19,2 кг/т чугуна. В виду лимитирования дренажа продуктов плавки на достижение высоких технико-экономических показателей плавки в опытном периоде в составе шихты загрузили марганцевую руду в количестве 35,9 кг/т чугуна. Для улучшения смешивания коксового орешка и марганцевой руды загрузку марганцевой руды в бункер БЗУ осуществляли после загрузки кокса мелких фракций. Кластер «коксовый орешек – марганцевая руда» помещали между слоями железорудного сырья: первым в бункер БЗУ загружали железорудное сырье в количестве 50% от массы содержимого бункера, затем коксовый орешек, после чего марганцевую руду, следом оставшиеся 50% массы



На доменной печи № 9 ПАО «ММК» исследовали 4 периода с различным расходом кокса мелких классов. Отрицательное влияние повышенного расхода кокса мелких классов на дренаж горна в периодах IV и VI компенсировали загрузкой промывочных материалов (железная и марганцевые руды) и кокса с высокими физико-механическими и физико-химическими свойствами (таблицы 6.10, 6.11).

Таблица 6.11 – Показатели качества кокса, %

Периоды	$C^d$	$W^e$	$A^d$	$V^{daf}$	$S^d$	M10	M25	CRI	CSR
III	83,2	3,6	12,3	1,32	0,682	8,7	85,6	26,37	55,51
IV	84,8	4,4	11,3	1,06	0,450	8,0	85,0	31,97	57,93
V	84,0	4,0	12,1	1,25	0,61	8,4	85,6	29,88	54,74
VI	86,1	4,4	11,6	0,9	0,54	8,1	85,8	31,97	57,93

Согласно таблице 6.11 в периодах IV и VI по сравнению с периодами III и V увеличилась горячая прочность по CSR соответственно на 2,42 и 3,19 % абс.

В результате в опытных периодах II, IV и VI по сравнению с базовыми I, III и V улучшилась дренажная способность коксовой насадки в горне, на что указывают изменения показателей в таблице 6.12, что сопровождалось улучшением технико-экономических показателей работы печей согласно таблице 6.10.

Таблица 6.12 – Показатели дренажной способности горна печей № 9 и 10 по периодам

Наименование показателей	Расход коксового орешка, кг/т чугуна					
	19,1	19,3	10,9	26,9	18,3	25,5
Доменная печь	6			9		
Количество остающегося в печи шлака, т	22,4	21,4	11,4	10,8	18,3	15,6
Время от начала выпуска до появления шлака, мин	9,7	9,5	8,5	8,6	9,2	9,2
Расчетная вязкость шлака, Па·с	0,52	0,45	0,47	0,51	0,53	0,56

### 6.3 Анализ эффективности работы доменной печи использованием Марковских цепей

Разработали математические модели [506], описывающие случайные процессы, поскольку основные показатели работы печи – производительность и удельный расход кокса – часто изменяются во времени при неизменных уровнях параметров, характеризующих условия работы печи, в связи с чем они могут рассматриваться как меняющиеся из-за случайного стечения обстоятельств.

Для достижения цели динамического моделирования эффективности работы доменной печи использовались методы Марковского процесса, в частности Марковские цепи с дискретными состояниями и временем [507]. Дискретность времени обусловлена получением ежесуточных данных о выплавке чугуна и расходу кокса, описательная статистика которых приведена в таблице 6.13 в условиях работы доменной печи № 10 объемом 2014 м<sup>3</sup> ПАО «ММК». Объем выборки составил  $N=193$ . В обработке данных использовалось программное обеспечение систем STATISTICA [508], Mathcad [509] и WinQSB [510].

Таблица 6.13 – Числовые характеристики признаков эффективной работы доменной печи

Признаки	Среднее	Доверительный интервал, %		Минимум	Максимум	Дисперсия	Стандартное отклонение
		-95	+95				
П	3702	3658	3752	2579	4398	89407	299,01
$K_{уд}$	469,9	467,8	471,9	429,3	524,5	196,28	14,01

Выборка учитываемых признаков репрезентативна, так как отбор данных осуществлялся последовательно без пропусков каждые сутки на протяжении большого периода времени, а гистограммы этих признаков практически имеют нормальное распределение вероятностей (рисунок 6.1).

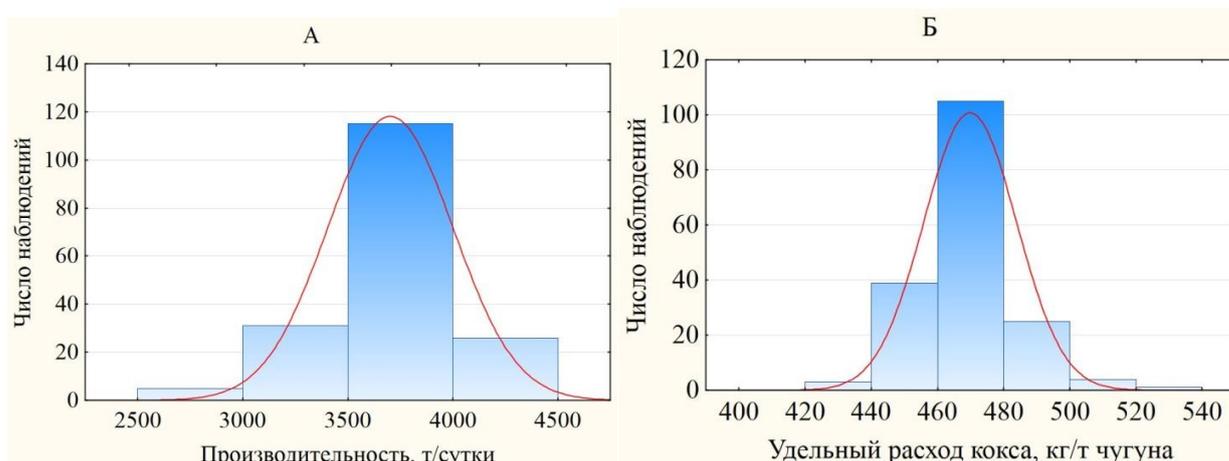


Рисунок 6.1 – Гистограмма суточной производительности (А) и удельного расхода кокса (Б) на доменной печи объема 2014 м<sup>3</sup>

Нужно заметить, что статистические данные таблицы 6.13, хотя и получены на большом промежутке времени, однако они не содержат информации о самом времени, в котором происходят изменения значений этих признаков. Фактор времени очень важно учитывать для прогнозирования показателей эффективности работы доменной печи при переходах из одних состояний в другие.

Для построения Марковской цепи, отражающей переходы состояний эффективности от настоящего к будущему, необходимо было решить две практические задачи: определение самих состояний эффективности и выявление частот переходов из одних состояний в другие.

Решение первой задачи по определению числа состояний, очевидно, зависит от числа показателей эффективности. Мы остановились на двух показателях: суточная производительность чугуна  $\Pi$ , т, и удельный расход кокса  $K_{уд}$ , кг/т чугуна. Если каждый из этих двух показателей отобразить на трех уровнях, а именно низкий, высокий и средний уровни, то получим число уровней (состояний эффективности)  $n=3^2=9$ . Тогда по каждому показателю средний уровень можно определить как 95% доверительный интервал среднего значения, а уровни меньший и больший, чем доверительный интервал, окажутся соответственно слева и справа от него (таблица 6.14).

Таблица 6.14 – Описание состояний эффективности работы доменной печи

Идентификатор	Признаки состояний эффективности	Примечание	Доходность, баллы
E <sub>1</sub>	$P \in (\bar{P} \mp \Delta P_{95});$ $K \in (\bar{K} \mp \Delta K_{95})$	Работа печи со средними величинами технико-экономических показателей	5
E <sub>2</sub>	$P \in (\bar{P} \mp \Delta P_{95});$ $K \leq (\bar{K} - \Delta K_{95})$	Средняя производительность печи при пониженном удельном расходе кокса	6
E <sub>3</sub>	$P \in (\bar{P} \mp \Delta P_{95});$ $K \geq (\bar{K} + \Delta K_{95})$	Средняя производительность печи при повышенном удельном расходе кокса	4
E <sub>4</sub>	$P \leq (\bar{P} - \Delta P_{95});$ $K \in (\bar{K} \mp \Delta K_{95})$	Пониженная производительность печи при среднем удельном расходе кокса	2
E <sub>5</sub>	$P \leq (\bar{P} - \Delta P_{95});$ $K \leq (\bar{K} - \Delta K_{95})$	Пониженная производительность печи при пониженном удельном расходе кокса	3
E <sub>6</sub>	$P \leq (\bar{P} - \Delta P_{95});$ $K \geq (\bar{K} + \Delta K_{95})$	Пониженная производительность печи при повышенном удельном расходе кокса	1
E <sub>7</sub>	$P \geq (\bar{P} + \Delta P_{95});$ $K \in (\bar{K} \mp \Delta K_{95})$	Повышенная производительность печи при среднем удельном расходе кокса	8
E <sub>8</sub>	$P \geq (\bar{P} + \Delta P_{95});$ $K \leq (\bar{K} - \Delta K_{95})$	Повышенная производительность печи при пониженном удельном расходе кокса	9
E <sub>9</sub>	$P \geq (\bar{P} + \Delta P_{95});$ $K \geq (\bar{K} + \Delta K_{95})$	Повышенная производительность печи при повышенном удельном расходе кокса	7

Далее для оценки эффективности состояний оказалось нецелесообразным использовать цены стоимости чугуна и кокса, так как в условиях рынка на разных временных интервалах цены могут оказаться непостоянными. Может случиться, что в одни периоды при малом объеме выпуска чугуна цены его могут быть выше, чем стоимость чугуна при низкой производительности печи. То же может произойти и с ценами на кокс.

Следовательно, для учета эффективности работы доменной печи целесообразно было использовать *бальную* систему относительно средних значений и по выпуску объема чугуна, и по удельному расходу кокса. Удобной для оценки эффективности работы печи оказалась *девятибалльная шкала доходности* от производства чугуна по аналогии с числом состояний, в котором прибывает доменная печь, переходя случайным образом из одних состояний в другие. Бальная шкала доходности от эффективности работы доменной печи приведена в таблице 6.14 (последний столбец).

Решение второй задачи – это формирование первичных данных для исследований случайного процесса. Выявлялись частота вхождения и количество суток пребывания системы в каждом состоянии и частоты выхода системы в другие состояния (таблица 6.15).

Таблица 6.15 – Частоты входа (в знаменателе главной диагонали – количество суток) и выхода доменной печи объемом 2014 м<sup>3</sup> из наблюдаемых состояниях

Состояния	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$	$E_5$	$E_6$	$E_7$	$E_8$	$E_9$
$E_1$	5/5	1	0	0	0	3	0	1	0
$E_2$	2	10/10	0	0	4	0	1	3	0
$E_3$	0	0	10/14	0	1	1	1	0	7
$E_4$	1	0	0	5/10	1	6	0	1	0
$E_5$	0	3	1	1	11/30	3	0	3	0
$E_6$	0	0	2	4	3	13/30	1	0	3
$E_7$	0	1	0	0	0	0	4/5	0	3
$E_8$	1	4	0	0	1	0	1	11/36	4
$E_9$	1	1	7	0	1	4	0	3	17/37

Инструментом для анализа Марковских процессов с дискретными состояниями и временем служит переходная матрица  $P=(p_{ij})$ , где  $p_{ij}$  – вероятности перехода системы из состояния  $E_i$  в состояние  $E_j$ ,  $ij = \overline{1, n}$ ,  $n$  – число состояний ( $n=9$ ). Матрица  $P=(p_{ij})$  размером  $n \times n$  обладает следующими

свойствами:  $p_{ij} \geq 0$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ ;  $\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1$ .

Ниже приведена переходная матрица  $P$ , построенная по данным таблицы 6.15. Главная диагональ этой матрицы (элементы  $p_{ii}$ ) получена непосредственно как доля числа суток, приходящихся на  $i$ -состояние, от общего числа наблюдаемых суток (объема выборки  $N$ ). Остальные вероятности  $(1 - p_{ii})$  в  $i$ -строке определены пропорционально частотам переходов в  $j$ -состояние относительно суммарной частоты входов в  $i$ -состояние.

Следует заметить, что матрица  $P$  является регулярной, стационарной и эргодической, так как описывают Марковские процессы с соответствующими признаками:

- изменение состояний следует друг за другом через строго определенные промежутки времени (кратное суткам);
- момент начала наблюдений за поведением процесса роли не играет (вероятности  $p_{ii}$  фиксируемые);
- $m$ -степень матрицы  $P$  имеет элементы  $p_{ij} > 0$  (даже если в момент  $t_0$  имелись  $p_{ij} = 0$ ).

Марковские процессы используются для изучения краткосрочного и долгосрочного поведения стохастических систем. В данной работе мы представим анализ системы показателей эффективности работы доменной печи, в основу которого положена следующая переходная матрица:

$$P := \begin{pmatrix} 0.028248 & 0.194350 & 0 & 0 & 0 & 0.583052 & 0 & 0.194350 & 0 \\ 0.188701 & 0.056497 & 0 & 0 & 0.377401 & 0 & 0.094350 & 0.283051 & 0 \\ 0 & 0 & 0.079096 & 0 & 0.092090 & 0.092090 & 0.092090 & 0 & 0.644634 \\ 0.188700 & 0 & 0 & 0.056497 & 0.188700 & 0.377402 & 0 & 0.188701 & 0 \\ 0 & 0.226502 & 0.075501 & 0.075501 & 0.169491 & 0.226502 & 0 & 0.226503 & 0 \\ 0 & 0 & 0.127771 & 0.255541 & 0.191656 & 0.169491 & 0.063885 & 0 & 0.191656 \\ 0 & 0.242938 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.028249 & 0 & 0.728813 \\ 0.072419 & 0.289676 & 0 & 0 & 0.072419 & 0 & 0.072419 & 0.203391 & 0.289676 \\ 0.046527 & 0.046527 & 0.325689 & 0 & 0.046527 & 0.186109 & 0 & 0.139582 & 0.209039 \end{pmatrix}$$

### Результаты моделирования и их обсуждение

Для регулярной эргодической переходной матрицы  $P$  вычисляются стационарные (финальные) вероятности. По определению  $\lim_{m \rightarrow \infty} p^{(0)} P^m = Y$ , где  $p^{(0)}$  – любой стохастический вектор, используемый в таком обозначении как вектор начального состояния. Тогда  $i$ -строки финальной матрицы  $Y$  содержат один и тот же стационарный вектор  $(y_1, y_2, \dots, y_9)$ , координаты которого  $y_i$  используются для вычисления среднего времени  $\tau_{ii}$  возвращения системы в  $E_i$  состояние,  $\tau_{ii} = 1 / y_i$ , а при задании вектора доходности  $C = (c_1, c_2, \dots, c_9)$ , и умножая его скалярно на стационарный вектор, получаем доходность системы в установившемся ее финальном состоянии, включая, естественно, и компоненты доходности от каждого из состояний. Результаты представлены в таблице 6.16.

Таблица 6.16 – Результаты поиска основных параметров Марковской цепи по состояниям эффективности работы доменной печи объема 2014 м<sup>3</sup>

Параметры состояний	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$	$E_5$	$E_6$	$E_7$	$E_8$	$E_9$
Стационарные вероятности	0,051	0,106	0,108	0,053	0,132	0,156	0,041	0,138	0,214
Возвратность (в сутках)	20	9	9	19	8	6	24	7	5
Компоненты доходности	0,255	0,636	0,432	0,106	0,396	0,156	0,328	1,242	1,498

Стационарные вероятности интерпретируются как среднее время пребывания системы в наблюдаемых состояниях для очень длительного периода работы. Возвратным называют состояние системы, если оно вновь может быть достигнуто спустя  $m$  шагов.

Средняя производительность доменной печи в наблюдаемый период составляет 5,049 т/сут при удельном расходе кокса около 470 кг/т чугуна, что отвечает такой эффективности (см. таблицу 6.14), если бы печь постоянно пребывала в состоянии  $E_1$  (средние технико-экономические показатели

работы). Однако печь в состоянии  $E_1$  пребывает весьма редко и непродолжительно, зато более *продолжительны* доходные состояния  $E_8$  и  $E_9$ , и с коротким временем возвратности наблюдается нивелирование доходами в состояниях  $E_4$ ,  $E_5$  и  $E_6$  с низким уровнем доходности.

Стохастические системы удобно также рассматривать в пошаговом режиме, причем наряду с переходной матрицей для прогноза состояний системы вводят вектор начального состояния системы  $p^{(0)} = (p_1^{(0)}, p_2^{(0)}, \dots, p_n^{(0)})$ . Переходная матрица  $P = (p_{ij})$  от шага к шагу изменяется, стремясь к своему предельному формату, и для числа  $m$  шагов определяется как  $m$ -степень матрицы  $P$ . Вектор последующих состояний системы  $p^{(m)} = p^{(m-1)} \cdot P = p^{(0)} \cdot P^m$ , откуда следует возможность прогнозировать среднее время соответствующих переходов,  $\tau_{ij}^{(m)} = 1 / p_j^{(m)}$ . В таблице 6.17 приведена информация о первом времени перехода из состояний  $E_i$  в состояния  $E_j$ .

Таблица 6.17 – Данные расчета о первом времени перехода системы из каждого состояния  $E_i$  (строки) в другие  $E_j$  состояния (столбцы)

Переходы состояний	$E_i \rightarrow E_1$	$E_i \rightarrow E_2$	$E_i \rightarrow E_3$	$E_i \rightarrow E_4$	$E_i \rightarrow E_5$	$E_i \rightarrow E_6$	$E_i \rightarrow E_7$	$E_i \rightarrow E_8$	$E_i \rightarrow E_9$
$E_1$	20	10	12	20	9	4	24	8	7
$E_2$	16	9	13	22	6	8	22	7	7
$E_3$	21	12	9	22	10	7	23	10	3
$E_4$	17	11	13	19	8	5	25	8	7
$E_5$	20	9	12	20	8	7	24	7	7
$E_6$	20	12	11	16	8	6	24	10	6
$E_7$	20	10	10	23	10	8	24	9	3
$E_8$	18	8	12	23	9	8	23	7	5
$E_9$	20	12	8	22	10	7	25	9	5

Из таблицы 6.17 очевидно, что исследуемая доменная печь устойчиво сохраняет следующую тенденцию переходов:

– из любого состояния система весьма длительное время входит в состояние  $E_7$  (в среднем около 24 суток) и самое короткое время затрачивается

для входа в состояние  $E_9$  (в среднем 5,5 суток) – это очень эффективное состояние, особенно  $E_8$  (со средним ожиданием 8,3 суток);

– в малоэффективные состояния ( $E_4 - E_6$ ) вхождение происходит также из любого состояния, однако продолжительное время затрачивается только для  $E_4$  (в среднем около 21 суток), в остальные же состояния – в среднем около 7 суток;

– состояние  $E_1$  со средней технико-экономической эффективностью случаются не чаще 19 суток, но лучшее  $E_2$  и худшее  $E_3$  для средней имеют время ожидания около 11 и 10 суток соответственно.

Представляет также интерес *временной параметрический анализ* для прогноза вероятностей пребывания системы в период, например с 1 по 10 циклы с шагом, равным единице (по суткам), если в начальный момент времени  $t_0$  система находится в определенном состоянии  $E_i$ . Например, если достоверно известно, что система находится в состоянии  $E_2$ , то вектор начального состояния будет иметь вид  $p^{(0)} = (p_1^{(m)}, p_2^{(m)}, \dots, p_n^{(m)})$ . Для всякого вектора  $p^{(0)}$ , используя пошаговые процедуры, описанные выше, определяем  *$m$ -шаговый вектор*  $p^{(m)} = (p_1^{(m)}, p_2^{(m)}, \dots, p_n^{(m)})$ , где  $p^{(m)}$  – вероятность  $i$ -состояния,  $i = \overline{1, n}$  ( $n=9$ ) после  $m$  шагов.

Временной параметрический анализ выполнялся по каждому состоянию при условии достоверного нахождения системы в начальный момент времени  $t_0$  в этих состояниях, результаты сведены в таблицу 6.18.

Обратим внимание, что эргодические системы, как правило, склонны к стабилизации, и переходный процесс в них протекает кратковременно. Поэтому финальное состояние системы достигается быстро, а первые переходы обычно содержат экстремальные уровни вероятностей, которые также кратковременно определяют параметры состояний эффективности работы системы.

Таблица 6.18 – Временной параметрический анализ вероятностей состояний  
с 1 по 10 сутки

Время, сутки	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$	$E_5$	$E_6$	$E_7$	$E_8$	$E_9$
1	0,028	0,056	0,079	0,056	0,170	0,169	0,028	0,203	0,209
2	0,052	0,230	0,235	0,114	0,195	0,216	0,024	0,194	0,330
3	0,058	0,115	0,133	0,077	0,136	0,175	0,049	0,154	0,241
4	0,052	0,125	0,130	0,057	0,142	0,161	0,039	0,146	0,235
5	0,052	0,111	0,117	0,057	0,135	0,159	0,041	0,141	0,223
6	0,052	0,110	0,113	0,054	0,134	0,157	0,041	0,139	0,219
7	0,052	0,107	0,111	0,053	0,133	0,157	0,041	0,139	0,217
8	0,051	0,107	0,110	0,053	0,133	0,156	0,041	0,138	0,214
9	0,051	0,106	0,109	0,053	0,132	0,156	0,041	0,138	0,215
10	0,051	0,106	0,109	0,053	0,132	0,156	0,041	0,138	0,215

Временной параметрический анализ эффективности работы исследуемой доменной печи в текущих условиях ее эксплуатации выявил следующее:

– в каждом состоянии обнаруживается «всплеск» вероятности в основном на втором шаге ( $m=2$ ) относительно начала наблюдения, за исключением состояний  $E_1$  и  $E_7$  (при  $m=3$ ) и  $E_8$ , где наблюдаемая вероятность  $p_8^{(m)}$  монотонно снижается от  $p_8^{(1)}=0,203$  до своей стационарной величины  $y_8=0,138$ ;

– существенная величина «всплеска» (по убыванию) наблюдалась в  $E_2$ ,  $E_3$  и  $E_9$ , где соответственно  $p_2^{(2)} - p_2^{(1)}=0,174$ ,  $p_3^{(2)} - p_3^{(1)}=0,156$  и  $p_9^{(2)} - p_9^{(1)}=0,121$ , а минимальная – в  $E_1$ , где  $p_1^{(3)} - p_1^{(1)}=0,03$ , при этом состояние  $E_7$  имеет два экстремума, незначительно отличающихся  $p_7^{(2)}=0,027$  и  $p_7^{(3)}=0,049$ ;

– «всплески» вероятностей относительно стационарных состояний кратковременны, но оказывают влияние на соответствующие компоненты эффективности работы доменной печи, максимально – в состоянии  $E_2$  на 1,044 балла, а минимально – в  $E_6$  на 0,047 балла;

– при  $m > 3$  от начала наблюдения за эффективностью доменного процесса при условии достоверности какого-либо его состояния прогнозирование вероятностей пребывания в этом состоянии ухудшается из-за

стремления к стационарной вероятности, а сохранение состояния или переход в другие состояния зависит от вероятностей (компонент)  $m$ -шагового вектора состояний  $p^{(m)} = p^{(m-1)} \cdot P$ .

Наиболее характерные графики прогноза вероятностей состояний системы, в которых она достоверно находилась в начальный момент времени, построены по данным таблицы 6.18 на рисунке 6.2.

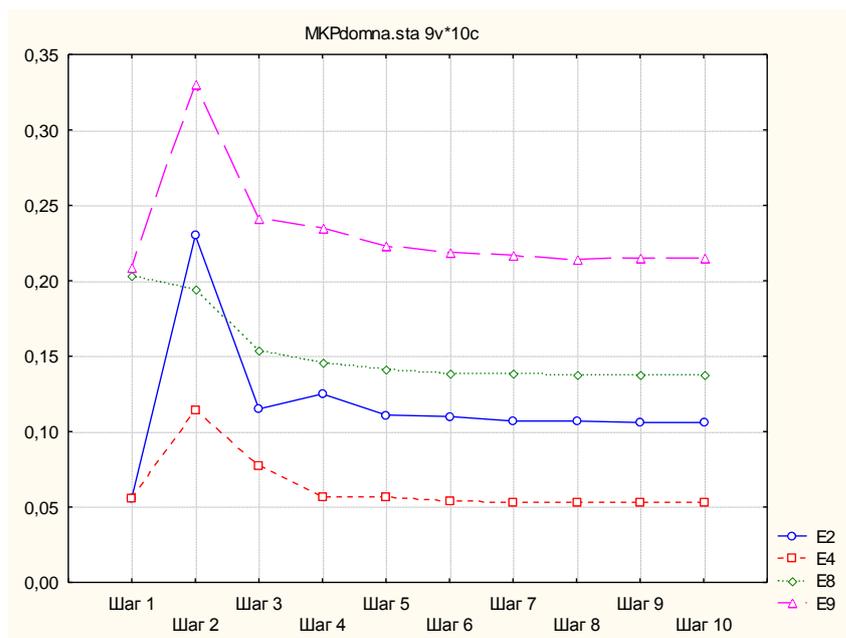


Рисунок 6.2 – Прогноз пошаговых вероятностей для состояний с разными уровнями их стационарных вероятностей (сверху вниз)  $E_9$ ,  $E_8$ ,  $E_2$  и  $E_4$

#### 6.4 Формирование нейросетевой модели для выявления технологических мероприятий, уменьшающих газодинамическую напряженность в нижней части печи

Нейросетевым моделированием выявили технологические мероприятия, уменьшающие газодинамическую напряженность в нижней части доменной печи [511, 512]. Для этого создали нейронную сеть (рисунок 6.3) для прогноза коэффициента сопротивления потоков шихты и газа в нижней части доменной печи. Выбранные технологические параметры представлены в таблице 6.19.

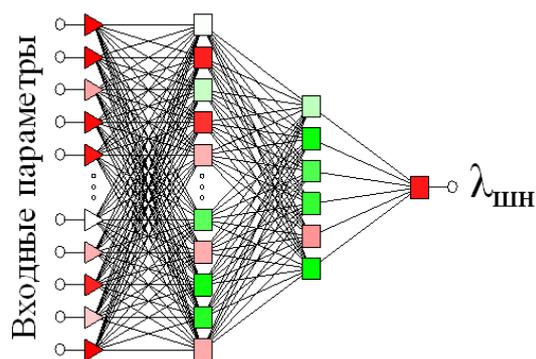


Рисунок 6.3 – Структура нейронной сети для определения коэффициента сопротивления в нижней части печи

Таблица 6.19 – Характеристики дутья, железорудного сырья, кокса и степень их влияния на  $\lambda_{шн}$  в исследуемый период

Наименование показателей	Значение			Ранг	Коэффициент
	min	max	среднее значение для всей выборки		
Содержание кислорода в дутье, %	24,3	29	27	1	1,78
Расход природного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна	84,5	131,9	120,5	5	1,20
Расход пара на увлажнение дутья, г/м <sup>3</sup>	0	12,2	6,1	10	1,08
Температура горячего дутья, °С	1103	1187	1171	2	1,44
Содержание в шихте, %: FeO	7,4	10,62	9,11	13	1,01
MgO	1,52	1,72	1,63	8	1,13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,97	2,29	2,19	3	1,36
Основность сырья	0,93	1,09	1,02	12	1,04
Характеристики кокса, %: M10	8,33	9,63	9,07	6	1,17
M25	84,9	87	86	14	-
CRI	30,5	31,9	31,4	4	1,34
CSR	55,5	57,4	56,4	7	1,16
Содержание в агломерате фракции 0-5 мм, %	6,8	16,65	10,38	11	1,06
Интенсивность по сырью, т/(м <sup>3</sup> ·сут)	2,95	4,43	3,96	9	1,10

Тестовые испытания модели на адекватность на данных, не входящих в обучающую выборку, показало, что средняя относительная ошибка прогноза составила 0,28, максимальная из всей выборки – 2,82 (таблица 6.20).

Таблица 6.20 – Результаты сравнения фактических и прогнозируемых данных

Наименование показателей	Значения
Относительная ошибка прогноза: средняя максимальная	0,28
	2,82
Отношение стандартов	0,1
Корреляция	0,99

Обработкой полученных результатов получили аналитическое уравнение, описывающее влияние технологических параметров доменной плавки на газодинамические процессы в нижней части печи. Для этого все параметры разделили на три группы: характеристики дутья (содержание кислорода в дутье, расход природного газа, температура горячего дутья, влажность дутья), железорудной части шихты (основность сырья, содержание в шихте FeO, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, содержание мелочи в агломерате, интенсивность по сырью) и качества кокса. При усреднении параметров в группах учитывалась степень их влияния на коэффициент сопротивления шихты движению газов в нижней части печи. Для получения математической модели воспользовались методом наименьших квадратов. Следовательно, обеспечивалось стремление квадрата разности экспериментальных точек и аппроксимирующей функции к минимуму, то есть

$$\sum_{i=1}^n (y - \hat{y})^2 \rightarrow \min . \quad (6.3)$$

Функцию  $\hat{Y}$  представили в виде полинома второй степени:

$$\hat{Y} = B_0 + \sum_{j=1}^m B_j X_j + \sum_{j=1, l \neq j}^{m-1} B_{jl} X_j X_l + \sum_{j=1}^m B_{jj} X_j^2 , \quad (6.4)$$

где  $B_0$  – постоянная составляющая;

$B_j$  – линейная составляющая;

$B_{jl}$  – составляющая, учитывающая взаимодействие факторов;

$B_{jj}$  – квадратичная составляющая.

Условием минимума функции (6.3) является одновременное равенство нулю частных производных по всем неизвестным (система уравнений (6.5)). Такими в уравнении (6.4) являются коэффициенты аппроксимации.



доменной печи. Для получения данной зависимости с безразмерными величинами перед обработкой каждый элемент выборки поделили на базовые значения. В результате получили уравнение следующего вида [513]:

$$\lambda = 1,96 + 0,88Д + 12,71ЖРС + 15,91К - 2,48Д \cdot ЖРС + 6,57Д \cdot К - 5,93ЖРС \cdot К - 1,68Д^2 - 0,3ЖРС^2 - 14,22К^2, \quad (6.7)$$

где Д – комплексный показатель, характеризуемый содержанием кислорода в дутье, его температурой, расходами природного газа и водяного пара;

ЖРС – комплексный показатель, включающий расход сырья в единицу времени, содержание в нем FeO, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, фракции 0-5 мм и основность;

К – комплексный показатель, включающий M10, M25, CSR и CRI.

Относительная ошибка расчетных величин не превышает 3,52 %.

Действие рассматриваемых факторов на коэффициент сопротивления шихты соответствуют таблице 6.19.

В результате установили, что в зависимости от условий хода доменной плавки имелось прямое и обратное влияние расхода природного газа на коэффициент сопротивления шихты в нижней части доменной печи (рисунок 6.4, А). При низком содержании кислорода (менее 25%) увеличение расхода природного газа действовало в направлении увеличения коэффициента сопротивления шихты в нижней части печи. При содержании кислорода в дутье более 25% действие расхода природного газа имело обратный характер и сопровождалось улучшением газопроницаемости в нижней части печи (рисунок 6.4, Б).

Прямое и обратное влияние расхода природного газа на  $\lambda_{\text{ших}}$  от концентрации кислорода в дутье могло быть обусловлено действием этих параметров на восстановление, плавление и шлакообразование. Концентрация кислорода в дутье менее 25% и расход природного газа менее 90 м<sup>3</sup>/т чугуна обеспечивают нормальное распределение процессов по высоте печи. Повышение расхода природного газа способствует увеличению

протяженности зон плавления и шлакообразования, что приводит к увеличению коэффициента сопротивления шихты движению газов в нижней части печи. Содержание кислорода более 25 % при низком расходе природного газа приводит к сужению зоны плавления и шлакообразования, что способствует наложению на них процессов восстановления. Это может сопровождаться вспениванием шлака и вследствие этого ухудшением газопроницаемости материалов в нижней части печи. Повышение расхода природного газа обеспечивает увеличение протяженности зоны вязкопластичного состояния до нормальной высоты, что действует в направлении снижения коэффициента сопротивления шихты.

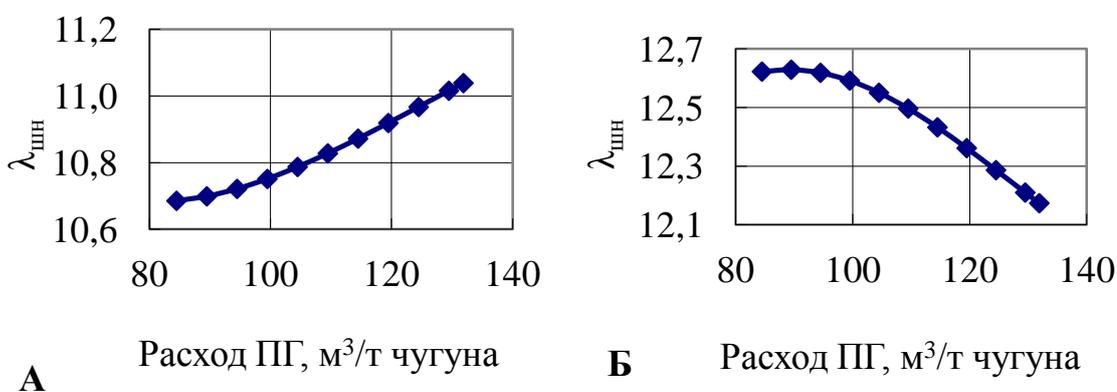


Рисунок 6.4 – Зависимость коэффициента сопротивления шихты в нижней части печи от расхода природного газа при содержании кислорода в дутье 24 и 29%

Влияние качества кокса по показателям CRI и CSR на коэффициент сопротивления шихты зависело от расхода природного газа (ПГ). В условиях расхода ПГ в пределе 85–115 м<sup>3</sup>/т чугуна и содержании кислорода в дутье в интервале 24-29% увеличение горячей прочности по CSR при снижении реакционной способности кокса по CRI способствовало уменьшению λ<sub>шн</sub> (рисунок 6.5). При расходе природного газа 85 м<sup>3</sup>/т чугуна и содержании кислорода 27% увеличение горячей прочности кокса от 55,5 до 57,4 % сопровождалось снижением коэффициента сопротивления шихты в нижней части печи на 4,0%, что указывает на улучшение газопроницаемости столба шихты в нижней части печи.

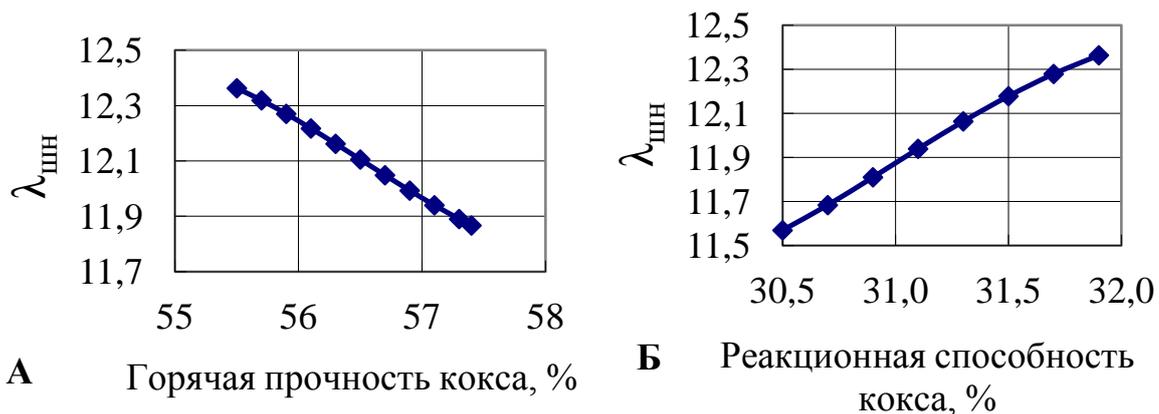


Рисунок 6.5 – Влияние горячей прочности (А) и реакционной способности кокса (Б) на коэффициент сопротивления шихты в нижней части печи при расходе природного газа 85 м<sup>3</sup>/т чугуна и содержании кислорода 27%

При вдувании в доменную печь природного газа в количестве 115-132 м<sup>3</sup>/т чугуна с содержанием кислорода в дутье в интервале 24–29% повышение реакционной способности кокса от 30,5 до 31,9 % положительно влияло на газодинамику в нижней части печи согласно рисунку 6.6. При расходе природного газа 132 м<sup>3</sup>/т чугуна и содержании кислорода 27% увеличение реакционной способности кокса от 30,5 до 31,9 % обеспечивало снижение коэффициента сопротивления шихты движению газового потока в нижней части печи на 2,1%.

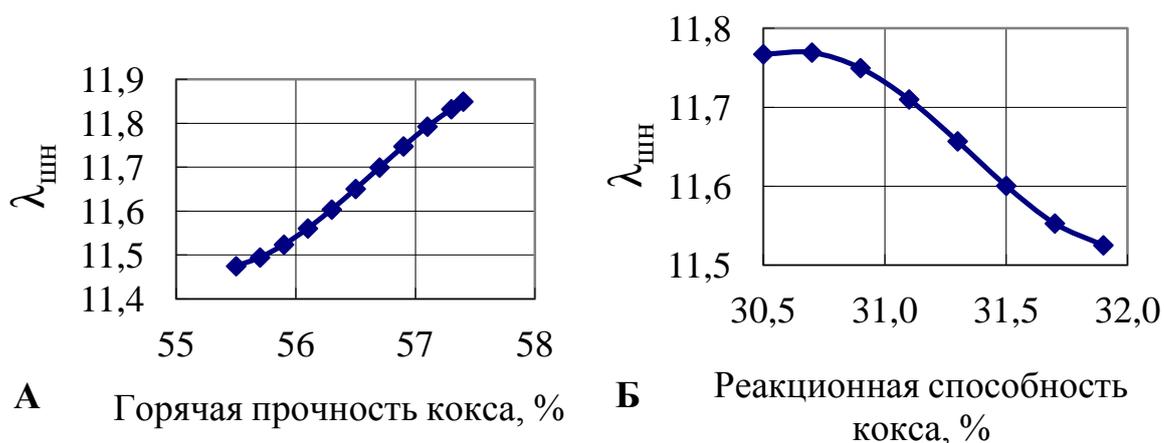


Рисунок 6.6 – Влияние горячей прочности (А) и реакционной способности кокса (Б) на коэффициент сопротивления шихты в нижней части печи при расходе природного газа 132 м<sup>3</sup>/т чугуна и содержании кислорода 27%

Механизм влияния горячей прочности и реакционной способности кокса на коэффициент сопротивления шихты движению газа в нижней части печи в зависимости от расхода природного газа заключается в следующем. При вдувании природного газа в доменную печь в первую очередь протекают реакции горения углеводородов в кислороде. Оставшийся кислород взаимодействует с углеродом кокса. В связи с чем при низком расходе природного газа в интервале 85-115 м<sup>3</sup>/т чугуна остается больше кислорода на протекание реакций горения углерода кокса. Например, для условий расхода природного газа 100 м<sup>3</sup>/т чугуна и дутья 1200 м<sup>3</sup>/т чугуна при содержании кислорода в нем 27% после горения природного газа в кислороде по реакции  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$  остается кислорода 124 м<sup>3</sup>/т чугуна. В условиях высокой концентрации кислорода процесс горения кокса протекает интенсивно. В этом случае определяющим является горячая прочность кокса, и, следовательно, низкая реакционная способность и высокая горячая прочность кокса положительно влияют на ход процессов в доменной печи. Повышение расхода природного газа от 100-115 до 132 м<sup>3</sup>/т чугуна сопровождается увеличенным количеством затраченного кислорода на его горение. Например, при сохранении расхода дутья на уровне 1200 м<sup>3</sup>/т чугуна с концентрацией кислорода в нем 27% и расходе природного газа 132 м<sup>3</sup>/т чугуна, после протекания реакции горения природного газа в кислороде ( $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ) остается 60 м<sup>3</sup>/т чугуна  $\text{O}_2$  на протекание реакций горения в нем углерода кокса, то есть более чем в два раза по сравнению с результатом горения в кислороде 100 м<sup>3</sup>/т чугуна природного газа. В условиях меньшего количества кислорода определяющим становится реакционная способность кокса и, следовательно, протекание реакции горения углерода кокса в кислороде, что сопровождается ростом коэффициента сопротивления шихты движению газового потока и ухудшением технико-экономических показателей работы печи. В результате повышение реакционной способности кокса будет компенсировать недостаток кислорода в фурменном очаге в условиях повышенного расхода природного газа.

Изменение химического состава шихты в направлении повышения подвижности шлака сопровождалось понижением коэффициента сопротивления шихты движению газового потока в нижней части печи. В результате при содержании MgO в шихте 1,5-1,7 % уменьшение концентрации  $Al_2O_3$  в сырье от 2,29 до 2,09% уменьшало коэффициент сопротивления шихты движению газов в нижней части печи на 1,57 %. Дальнейшее его понижение от 2,09 до 1,97 % уменьшало  $\lambda_{\text{шн}}$  на 0,35 % (рисунок 6.7).

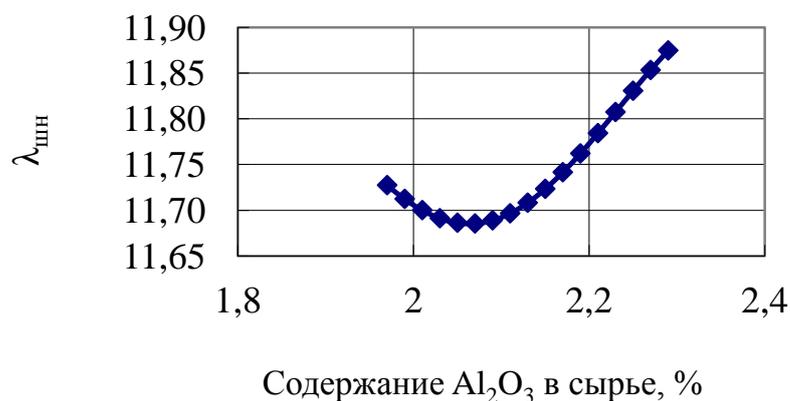


Рисунок 6.7 – Зависимость коэффициента сопротивления шихты в нижней части печи от интенсивности по сырью (А) и содержания в сырье  $Al_2O_3$  (Б)

Такое влияние содержания в шихте  $Al_2O_3$  объясняется наличием экстремума по отношению  $SiO_2/Al_2O_3$  в интервале 2,5-3,5 на вязкость шлака [390, 514]. Анализ полусинтетических шлаков показывал, что при содержании MgO в шлаке 8% и его основности по  $CaO/SiO_2$ , равной 1,0, наименьшей вязкости шлака при температуре  $1300^{\circ}C$  соответствовало отношение  $SiO_2/Al_2O_3$ , равное 2,9. Увеличение или уменьшение кремниевого модуля повышало вязкость шлака. Для условий ПАО «ММК» в исследуемых периодах содержанию  $Al_2O_3$  в шихте соответствовало отношение по  $SiO_2/Al_2O_3$  в шлаке, равное 2,86.

Снижению коэффициента сопротивления шихты движению газов в нижней части печи на 4,3% обеспечивало увеличение содержания FeO в сырье на 3,2% от 7,4 до 10,6%.

## **6.5 Выявление рациональных соотношений расходов природного газа и кислорода в зависимости от показателей качества кокса по CRI и CSR**

Нейросетевым моделированием, статистическим анализом работы доменных печей № 4 и 6 ПАО «ММК» установили зависимость удельного расхода природного газа и эффективность его использования от реакционной способности кокса по CRI и горячей прочности по CSR [515-517].

Для этого за период длительностью 5 лет работы доменной печи № 6 ПАО «ММК» выделили 6 периодов, продолжительностью каждого в среднем по 32 недели, при работе с удельным расходом природного газа в интервалах: 90-100; 110-120; 120-130; 130-140; 140-153 м<sup>3</sup>/т чугуна. Показатели работы печи представлены в таблицах 6.21, 6.22.

В периоде I средняя величина удельного расхода природного газа составляла 95,9 м<sup>3</sup>/т чугуна. Расход газа менее 100 м<sup>3</sup>/т чугуна являлся результатом низкого содержания кислорода в дутье – 25,7% и высокой газодинамической напряженностью в верхней части печи. Лимитированию в верхней зоне по газодинамике способствовала работа печи с низкой горячей прочностью железорудного сырья, равной 63,6 %. Для снижения взаимного сопротивления потоков шихты и газа в верхней части печи процесс получения чугуна вели с раскрытой периферией. Содержание железорудного материала в шихте, поступающей со станций углового положения лотка № 9-11, составляло 90,2 %. Это позволяло работать с высоким расходом дутья, равным 2918 м<sup>3</sup>/мин при общем выходе фурменного газа 3802 м<sup>3</sup>/мин. На преимущественное движение газового потока через периферийную часть печи указывает высокая разность температур периферийного и колошникового газа, равная 193 °С, увеличенная температура радиального газа на периферии, равная 217 °С. Работа печи с открытой периферией, наряду с низким удельным расходом природного газа сопровождалась высоким потреблением удельного расхода кокса, равным 464,4 кг/т чугуна. Производительность печи в периоде I составила 3627 т/сут.

Таблица 6.21 – Основные технологические показатели работы доменной печи № 6  
в периоды I-VI

Наименование показателей	Интервал варьирования удельного расхода природного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна					
	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-153
Номер периода	I	II	III	IV	V	VI
Длительность периода, неделя	20	37	46	43	25	19
Расход, м <sup>3</sup> /т чугуна: дутья	1158	1135	1125	1111	1136	1143
природного газа	95,9	104,7	113,8	124,4	135,7	143,8
Удельный расход кокса сухого, скипового), кг/т чугуна	464,4	456,7	448,0	432,2	421,5	416,6
Производительность по фактическому количеству загруженных пода, т/сут	3627	3613	3690	3710	3580	3552
Коэффициент замены кокса природным газом, кг/м <sup>3</sup>	-	0,9	1,0	1,5	0,9	0,6
Расход сырьевых материалов, кг/т чугуна	1680	1678	1679	1668	1682	1675
Содержание железа в шихте, %	57,80	57,87	57,84	58,19	57,71	57,96
Рудная нагрузка, т/т	3,618	3,675	3,749	3,860	3,993	4,026
Горячая прочность ЖРС, %	63,6	64,5	65,3	64,3	67,2	67,7
Давление колошникового газа, кПа	135	135	132	134	140	142
Уровень засыпи фактический, м	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,7
Эквивалентная по поверхности крупность железорудного сырья, мм	11,51	11,59	11,46	11,36	11,24	11,39
Содержание кислорода, %	25,7	26,4	27,4	27,3	27,1	27,2
Давление горячего дутья, кПа	270	270	270	270	271	270
Температура дутья, °С	1143	1169	1133	1150	1129	1127
Расход водяного пара, г/м <sup>3</sup>	2,79	3,09	3,89	4,10	4,90	5,32
Содержание железорудного материала в шихте по станциям углового положения лотка, %:						
№ 9-11 ( $\alpha_{пер}$ )	90,2	99,3	100	100	100	100
№ 6-8 ( $\alpha_{гр}$ )	49,1	44,1	43,8	43,6	43,6	43,8
№ 3-5 ( $\alpha_{пром}$ )	42,6	42,6	42,6	42,8	42,8	42,6
Горячая прочность кокса по CSR, %	48,8	47,1	46,3	45,3	37,5	37,6
Реакционная способность CRI, %	33,7	34,3	34,6	35,2	39,1	39,0
Интенсивность хода						
по дутью, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> минуту	2,13	2,08	2,10	2,09	2,06	2,06
по суммарному углероду, т/м <sup>3</sup> сут	1,055	1,029	1,032	1,003	0,945	0,923
Степень использования, % CO	42,4	42,5	42,2	42,3	42,3	42,4
H <sub>2</sub>	40,3	43,1	43,9	47,8	50,1	52,1
Коэффициент сопротивления шихты движению газов: на колошнике	0,12	0,12	0,11	0,12	0,12	0,14
в горне	8,67	9,07	8,62	8,59	8,62	8,42
общее	8,80	9,27	9,13	9,17	9,21	9,09
Выход фурменного газа, м <sup>3</sup> /мин	3802	3738	3860	3844	3801	3803

Таблица 6.22 – Результаты химического анализа продуктов плавки доменной печи № 6 в периоды I-VI

Наименование показателей	Интервал варьирования удельного расхода природного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна					
	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-153
	Периоды					
	I	II	III	IV	V	VI
Содержание в чугуне, %: Si	0,77	0,80	0,80	0,76	0,74	0,75
Mn	0,27	0,28	0,36	0,29	0,30	0,28
S	0,017	0,018	0,017	0,017	0,017	0,018
C	4,71	4,71	4,70	4,71	4,67	4,67
Содержание в шлаке, %: SiO <sub>2</sub>	38,1	38,2	38,9	38,8	39,2	39,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,4	11,3	10,4	10,6	9,9	10,0
CaO	38,0	38,0	38,8	39,0	39,4	39,0
MgO	8,33	8,43	8,22	7,86	7,9	8,1
S	0,69	0,69	0,69	0,69	0,67	0,67
CaO/SiO <sub>2</sub>	0,998	0,995	0,996	1,006	1,005	0,995

В периоде II по сравнению с периодом I изменили параметры дутья и загрузки. Увеличили содержание окатышей в составе шихты от 33,3 до 36,5%, что обеспечило повышение эквивалентной по поверхности крупности железорудного сырья от 11,5 до 11,6% и горячей прочности от 63,6 до 64,5%. Также в периоде II по сравнению с периодом I увеличилась реакционная способность кокса от 33,7 до 34,3%. Изменение параметров загрузки наряду с повышением содержания кислорода от 25,7 до 26,4% сопровождалось увеличением удельного расхода природного газа от 95,9 до 104,7 м<sup>3</sup>/т чугуна. Эффективное использование природного газа обеспечило повышение степени использования водорода от 40,3 до 43,1%, что сопровождалось уменьшением удельного расхода кокса от 464,4 до 456,7 кг/т чугуна. Коэффициент замены кокса природным газом в периоде II по сравнению с периодом I составил 0,9 кг/м<sup>3</sup>.

В периоде II увеличили содержание железорудного материала в шихте, поступающей со станций углового положения лотка № 9-11, от 90,2 до 99,3%. В условиях увеличения уровня засыпи от 1,3 до 1,4 м, уменьшения расхода дутья от 2918 до 2847 м<sup>3</sup>/мин при уменьшении выхода фурменного газа от

3802 до 3738 м<sup>3</sup>/мин коэффициент сопротивления шихты движению газового потока в верхней части печи остался неизменным. Производительность печи при этом уменьшилась от 3627 до 3613 т/сут.

В периоде III по сравнению с периодом II увеличилось содержание кислорода в дутье от 26,4 до 27,4%. Это наряду с ростом реакционной способности кокса от 34,3 до 34,6% обеспечило рост удельного расхода природного газа от 104,7 до 113,8 м<sup>3</sup>/т чугуна. В условиях роста расхода дутья от 2847 до 2882 м<sup>3</sup>/мин, увеличения содержания железорудного материала в шихте, поступающей в колошниковое пространство печи со станций углового положения лотка № 9-11, от 99,3 до 100% сохранению взаимного сопротивления потоков шихты и газа в верхней части печи способствовало увеличение горячей прочности железорудного сырья от 64,5 до 65,3% за счет уменьшения содержания в железорудной части шихты окатышей ССГПО, увеличения доли окатышей Михайловского ГОК и вовлечения окатышей Костомукшского и Лебединского ГОКов.

Эффективное использование природного газа в периоде III привело к повышению степени использования водорода от 43,1 до 43,9%, что сопровождалось уменьшением удельного расхода кокса от 456,7 до 448,0 кг/т чугуна. Коэффициент замены кокса природным газом в периоде III по сравнению с периодом II увеличился от 0,9 до 1,0. При этом производительность печи выросла от 3613 до 3690 т/сут.

В периоде IV по сравнению с периодом III увеличили удельный расход природного газа от 113,8 до 124,4 м<sup>3</sup>/т чугуна в условиях уменьшения содержания кислорода от 27,4 до 27,3%. Повышению расхода газа более чем на 10 м<sup>3</sup>/т чугуна способствовал рост реакционной способности кокса от 34,6 до 35,2%. При этом наблюдалась наиболее высокая эффективность использования природного газа. Увеличилась степень использования водорода от 43,9 до 47,8%. Удельный расход кокса при этом уменьшился от 448,0 до 432,2 кг/т чугуна. Производительность печи увеличилась от 3690 до 3710 т/сут. Этому способствовало увеличение температуры дутья от 1133 до 1150<sup>0</sup>С.

Уменьшение доли окатышей Михайловского ГОК от 22,0 до 16,2% за счет роста доли окатышей Костомукшского и Лебидинского ГОКов суммарно от 2,4 до 8,2% сопровождалось снижением горячей прочности железорудного сырья от 65,3 до 64,3%. Снизилась эквивалентная по поверхности крупность ЖРС от 11,46 до 11,36 мм. Ухудшение свойств железорудного сырья наряду с увеличением содержания железорудного материала в шихте, поступающей со станций углового положения лотка № 3-5 от 42,6 до 42,8%, ростом расхода природного газа в условиях уменьшения выхода фурменного газа от 3860 до 3844 м<sup>3</sup>/мин привело к увеличению газодинамической напряженности в верхней части печи. Следствием этого являлось уменьшение уровня засыпи от 1,6 до 1,7 м. Коэффициент сопротивления шихты движению газового потока в этой зоне в периоде IV по сравнению с периодом III увеличился на 5,3%.

В периоде V по сравнению с периодом IV увеличили реакционную способность кокса от 35,2 до 39,1%. Это позволило увеличить удельный расход природного газа от 124,4 до 135,7 м<sup>3</sup>/т чугуна в условиях уменьшения содержания кислорода в дутье от 27,3 до 27,1%.

Для уменьшения негативного влияния увеличения расхода газа на газодинамику верхней части печи уменьшили расход дутья от 2862 до 2825 м<sup>3</sup>/мин при повышении давления колошникового газа от 134 до 140 кПа. Выход фурменного газа снизился от 3844 до 3801 м<sup>3</sup>/мин. Положительное влияние на взаимное сопротивление потоков шихты и газа в верхней части печи оказывало увеличение горячей прочности железорудного сырья от 64,3 до 67,2 % за счет роста доли окатышей Михайловского ГОК от 16,2 до 30,3%, увеличение уровня засыпи от 1,6 до 1,7 м. В результате коэффициент сопротивления шихты движению газового потока в верхней части печи увеличился на 4,2%.

Таким образом, повышение расхода природного газа от 124,4 до 135,5 м<sup>3</sup>/т чугуна обеспечило увеличение степени использования водорода от 47,8 до 50,1%. Это создало условия для уменьшения удельного расхода кокса от 432,2 до 421,5 кг/т чугуна. Коэффициент замены при этом уменьшился от

1,5 до 0,9 кг/м<sup>3</sup>. Уменьшение расхода дутья от 2862 до 2825 м<sup>3</sup>/мин в условиях снижения его температуры от 1150 до 1129<sup>0</sup>С сопровождалось понижением производительности печи от 3710 до 3580 т/сут.

В периоде VI по сравнению с периодом V дополнительно увеличили удельный расход природного газа от 135,7 до 143,8 м<sup>3</sup>/т чугуна в условиях сохранения содержания кислорода и реакционной способности кокса. В условиях сохранения выхода фурменного газа на уровне 3803 м<sup>3</sup>/мин рост расхода газа сопровождался повышением коэффициента сопротивления шихты движению газового потока в верхней части печи на 15,9%.

Повышение расхода природного газа сопровождалось увеличением степени использования водорода от 50,1 до 52,1%. Удельный расход кокса уменьшился от 421,5 до 416,6 кг/т чугуна при снижении коэффициента замены кокса природным газом от 0,9 до 0,6 кг/м<sup>3</sup>. Осложнение взаимного сопротивления потоков шихты и газа в верхней части печи привело к снижению интенсивности загрузки доменной печи и уменьшению производительности печи от 3580 до 3552 т/сут.

Таким образом, наиболее высокая эффективность использования природного газа наблюдалась при его расходе 113,8-124,4 м<sup>3</sup>/т чугуна. Такое количество газа не требовало уменьшения расхода дутья с целью компенсации отрицательного влияния его расхода на газодинамику верхней части печи, что позволяло работать с наиболее высокой производительностью на уровне 3690-3710 т/сут. Обеспечить величину удельного расхода природного газа на уровне более 120 м<sup>3</sup>/т чугуна позволяло увеличение реакционной способности кокса от 35,2% в условиях содержания кислорода в дутье более 27%.

Дополнительное снижение удельного расхода кокса возможно за счет увеличения расхода природного газа выше 130-150 м<sup>3</sup>/т чугуна. В этом случае отрицательное влияние расхода природного газа компенсируется повышением реакционной способности кокса от 35 до 39% и снижением расхода дутья от 2862 до 2819 м<sup>3</sup>/мин. Это наряду со снижением удельного расхода кокса приводит к уменьшению производительности печи.

Проведением исследований на доменных печах № 4, 6 ПАО «ММК» установили рациональные соотношения расходов природного газа и кислорода в зависимости от условий работы печи по качеству кокса (таблица 6.23).

Таблица 6.23 – Рациональные соотношения расходов природного газа и кислорода в зависимости от реакционной способности кокса

CRI кокса, %	Соотношение расходов природного газа и всего кислорода в дутье
30-33	0,30-0,33
33-35	0,33-0,40
35-40	0,40-0,45
>40	0,45-0,40

Согласно таблице 6.23 при повышении реакционной способности кокса по CRI от 30 до 40% увеличивается рациональное соотношение расходов природного газа и всего поступающего в зону горения кислорода от 0,30 до 0,45. При увеличении реакционной способности кокса более 40% рациональное соотношение расходов природного газа и всего поступающего в зону горения кислорода уменьшается от 0,45 до 0,40.

Регулирование удельного расхода природного газа на доменных печах № 4 и 6 ПАО «ММК» при изменении реакционной способности и горячей прочности кокса обеспечивало повышение технико-экономических показателей их работы (таблицы 6.24, 6.25).

В условиях работы доменных печей № 4 и 6 ПАО «ММК» на коксе с горячей прочностью 40,2-41,0%, реакционной способностью 37,8-38,7% увеличение соотношений расходов природного газа и кислорода соответственно от 0,44 до 0,46 и от 0,42 до 0,45 обеспечило снижение удельного расхода кокса соответственно на 6,6 и 4,7 кг/т чугуна.

Понижение соотношений расходов природного газа и кислорода от 0,43 до 0,41 на доменной печи № 4 и от 0,45 до 0,40 на доменной печи № 6 ПАО «ММК» при работе их на коксе с горячей прочностью по CSR 35,5-35,9% и реакционной способности 41,6-42,7% снижало удельный расход кокса более чем на 3 кг/т чугуна.

Таблица 6.24 – Основные технологические показатели работы  
доменной печи № 4

Наименование показателей	Удельный расход природного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна			
	134,8	145,7	134,8	124,5
Отношение расходов природного газа и общего количества кислорода	0,44	0,46	0,43	0,41
Содержание кислорода, %	26,2	26,2	26,0	25,7
Горячая прочность кокса по CSR, %	42,2	41,0	33,5	35,5
Реакционная способность CRI, %	38,5	38,7	42,6	41,6
Расход, кг/т чугуна:				
сырьевых материалов	1659	1659	1665	1668
в том числе кварцита	1,34	1,75	2,60	7,01
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна:				
фактический	404,0	396,1	426,4	426,7
приведенный к условиям базового периода	-	397,4	-	423,3
Производительность, т/сут:				
по фактическому количеству загруженных подач	3668	3578	3495	3503
приведенная условиям базового периода	-	3558	-	3548
Рудная нагрузка, т/т	4,106	4,189	3,905	3,909
Содержание Fe в шихте, %	58,53	58,51	58,32	58,21
Интенсивность хода:				
по дутью, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> ·мин	2,17	2,16	2,11	2,11
по суммарному углероду, т/м <sup>3</sup> ·сут	0,92	0,88	0,93	0,93
Содержание в чугуне, %:				
Si	0,69	0,67	0,70	0,68
Mn	0,20	0,20	0,21	0,23
S	0,024	0,021	0,019	0,018
C	4,654	4,653	4,750	4,738
Содержание в шлаке, %:				
SiO <sub>2</sub>	39,1	38,7	38,7	38,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,4	10,8	10,6	11,0
CaO	38,6	38,2	39,1	38,7
MgO	7,51	7,73	7,46	7,65

Таблица 6.25 – Основные технологические показатели работы  
доменной печи № 6

Наименование показателей	Удельный расход природного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна							
	123,2	133,5	135,8	143,9	135,7	120,7	144,5	129,8
Соотношение расходов природного газа и общего количества кислорода	0,38	0,41	0,42	0,45	0,41	0,38	0,45	0,40
Содержание кислорода, %	27,2	28,4	27,6	27,0	27,1	27,0	27,0	27,2
Горячая прочность кокса по CSR, %	36,3	34,6	39,5	40,2	35,5	36,0	36,3	35,9
Реакционная способность (CRI), %	38,4	39,3	39,1	37,8	41,4	44,6	45,5	42,7
Расход, кг/т чугуна:								
сырьевых материалов	1694	1681	1678	1665	1657	1663	1661	1661
в том числе кварцита	2,4	34,8	-	44,2	11,5	19,4	44,3	140,3
марганцевой руды	23,7	18,1	23,9	13,0	1,9	-	4,1	-
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна:								
фактический	434,9	432,2	437,5	440,3	441,9	436,0	440,8	426,4
приведенный к условиям базового периода	-	430,2	-	435,9	-	438,7	-	417,7
Производительность, т/сут:								
по фактическому количеству загруженных подач	3467	3560	3512	3462	3375	3480	3440	3470
приведенная условиям базового периода	-	3490	-	3471	-	3412	-	3544
Рудная нагрузка, т/т	3,896	3,889	3,835	3,782	3,751	3,815	3,768	3,897
Содержание Fe в шихте, %	57,32	57,77	57,86	58,32	58,59	58,37	58,46	58,44
Интенсивность хода по дутью, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> ·мин	2,09	2,08	2,06	2,06	2,10	2,07	2,07	2,08
по суммарному углероду, т/м <sup>3</sup> сут	0,95	0,97	0,96	0,96	0,94	0,96	0,95	0,93
Содержание в чугуне, %:								
Si	0,72	0,71	0,63	0,68	0,69	0,68	0,67	0,74
Mn	0,37	0,38	0,43	0,37	0,27	0,22	0,30	0,27
S	0,021	0,020	0,021	0,021	0,019	0,021	0,022	0,020
C	4,609	4,632	4,608	4,647	4,650	4,639	4,673	4,694
Содержание в шлаке, %:								
SiO <sub>2</sub>	38,5	38,6	38,2	38,0	38,3	38,7	38,4	39,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,6	10,7	11,4	11,6	11,3	10,6	11,6	10,2
CaO	38,6	38,3	37,9	37,3	37,9	38,7	37,2	38,5
MgO	7,51	7,59	7,75	7,81	7,91	7,63	7,72	8,28

## Выводы по главе 6

1. Исследованиями на доменных печах, физическим и математическим моделированием установлена рациональная технология загрузки промывочных материалов в колошниковое пространство печи, которая включает учет горячей прочности кокса.

Загружать промывочные материалы к осевой зоне целесообразно при работе на коксе с горячей прочностью менее 35%. При её величине более 40% направлять эти материалы в зону рудного гребня, в интервале 35-40% – располагать в равных долях.

2. Исследования разработанных режимов загрузки конвертерного шлака и марганцевой руды в качестве промывочных материалов локальных зон горна проведены на доменных печах № 2 и 6 ПАО «ММК». Рациональная загрузка промывочных материалов в количестве 30-50 кг/т чугуна по разработанной технологии обеспечивала улучшение дренажной способности коксовой насадки в горне по различным показателям: уменьшалось количество шлака, остающегося в горне печи после выпуска жидких продуктов плавки, на 10-15%, вязкость шлака на 5%, неравномерность выдачи продуктов плавки по леткам на 10-15%, что обеспечивало повышение производительности печей более чем на 50 т/сут.

3. При использовании в составе шихты кокса мелких классов в количестве 19,3 кг/т чугуна локальная зона с наихудшей дренажной способностью кокса в горне печи соответствовала локальной зоне горизонтального сечения колошника, куда осуществлялась загрузка кокса мелких классов. Для устранения негативного влияния расхода коксового орешка обеспечивали загрузку в колошниковое пространство печи промывочного материала (марганцевой руды) в количестве 35,9 кг/т чугуна. Для перемешивания кокса мелких фракций с марганцевой рудой в процессе совместного выпуска их из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи в составе железорудных материалов в бункере БЗУ компоненты шихты

располагали следующим образом: в нижнюю часть бункера под коксовым орешком и промывочным материалом располагали 50% железорудных материалов от общей их массы и 50% над ними. При этом в бункере БЗУ марганцевую руду размещали над коксовым орешком. Использование разработанного режима загрузки кокса мелких фракций и марганцевой руды обеспечило уменьшение количества остающегося в печи шлака от 22,4 до 21,4 т/сутки, снижение удельного расхода кокса от 431,5 до 427,1 кг/т чугуна при повышении производительности печи от 3474 до 3484 т/сут.

4. Осуществили математическое моделирование в динамическом формате эффективности работы доменной печи № 10 ПАО «ММК» методом Марковской цепи с дискретными состояниями и временем. Вычислена совокупность параметров случайного процесса: для долгосрочного прогноза – стационарный вектор вероятностей состояний, среднее время возвратности (реверса) по каждому состоянию эффективности, оценка эффективности работы доменной печи в баллах; для кратковременного прогноза – первое время перехода из каждого состояния в любое другое состояние, номер шага при «всплеске» вероятности для каждого достоверного состояния в начальный момент времени и получены компоненты показателя эффективности.

5. Установлено, что средний уровень анализируемой эффективности доменной печи (суточная производительность 3702 т и удельный расход кокса 470 кг/т чугуна) достигается в основном за счет кратковременных переходов состояний с низкой эффективностью в состояния с высокой эффективностью и наоборот. Перевод системы на более эффективные и продолжительные состояния представляется возможным, что показала практика на этой же доменной печи. Использование метода Марковской цепи с дискретными состояниями и временем позволяет оценить вероятную величину изменения показателей работы доменной печи в заданном временном интервале при неизменных уровнях параметров, характеризующих условия её работы.

6. Установлено прямое и обратное влияние горячей прочности кокса по CSR и его реакционной способности по CRI на газодинамику нижней части

печи. При расходе природного газа в интервале 85-115 м<sup>3</sup>/т чугуна повышение горячей прочности кокса по CSR на 0,5% абс. в интервале 55,5-57,4% на доменной печи, работающей с напряженностью по силовому взаимодействию потоков шихты и газа в нижней части печи, уменьшало коэффициент сопротивления шихты на 1,04%, в интервале 115-132 м<sup>3</sup>/т чугуна повышение горячей прочности кокса на ту же величину увеличивало коэффициент сопротивления шихты на 0,87%.

7. Предложен научно обоснованный механизм влияния реакционной способности и горячей прочности кокса на коэффициент сопротивления шихты движению газового потока нижней части печи в зависимости от расхода природного газа. При вдувании природного газа в доменную печь в первую очередь протекают реакции горения углеводородов в кислороде. Оставшийся кислород взаимодействует с углеродом кокса. В связи с чем при низком расходе природного газа в интервале 85-115 м<sup>3</sup>/т чугуна остается больше кислорода на протекание реакций горения углерода кокса. В условиях высокой концентрации кислорода процесс горения кокса протекает интенсивно. В этом случае определяющим является горячая прочность кокса, и, следовательно, низкая реакционная способность и высокая горячая прочность кокса положительно влияют на ход процессов в доменной печи. Повышение расхода природного газа от 115 до 132 м<sup>3</sup>/т чугуна сопровождается увеличенным количеством затраченного кислорода на его горение. В условиях меньшего количества кислорода определяющим становится реакционная способность кокса и, следовательно, протекание реакции горения углерода кокса и кислорода, что сопровождается ростом коэффициента сопротивления шихты движению газового потока и ухудшением технико-экономических показателей работы печи.

8. Установили рациональные соотношения расходов природного газа и кислорода в зависимости от условий работы печи по качеству кокса.

При величине по CRI 30-33 % рациональное соотношение расходов природного газа и всего поступающего в зону горения кислорода составляло

0,30-0,32. В условиях работы печи с реакционной способностью кокса 33-35% рациональное соотношение расходов природного газа и всего поступающего в зону горения кислорода составляло 0,33-0,40. При работе доменной печи на коксе с реакционной способностью 35-40% рациональное соотношение расходов природного газа и кислорода было на уровне, равном 0,40-0,45. При дальнейшем увеличении реакционной способности кокса более 40% увеличение соотношения расходов газа и кислорода было нецелесообразным. Рациональная величина находилась на уровне 0,45-0,40.

9. В условиях работы доменных печей № 4 и 6 ПАО «ММК» на коксе с горячей прочностью 40,2-41,0%, реакционной способностью 37,8-38,7% увеличение соотношения расходов природного газа и кислорода соответственно от 0,44 до 0,46 и от 0,42 до 0,45 обеспечило снижение удельного расхода кокса соответственно на 6,6 и 4,7 кг/т чугуна.

Понижение соотношения расходов природного газа и кислорода от 0,43 до 0,41 на доменной печи № 4 и от 0,45 до 0,40 на доменной печи № 6 ПАО «ММК» при работе их на коксе с горячей прочностью по CSR 35,5-35,9% и реакционной способности 41,6-42,7% снижало удельный расход кокса более чем на 3 кг/т чугуна.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны новые научно обоснованные технологические решения локального воздействия на лимитирующие зоны и процессы доменной плавки для энергоресурсосбережения, структурированные в интерактивную систему с приёмами цифровизации, основными составляющими которой являются: физическое и математическое моделирование, аналитическое изучение производственной ситуации и информационной среды, проведение опытных плавов, сопровождение тестируемых режимов, введение изменений в технологической инструкции, внедрение полученных результатов.

2. Физическим моделированием установлены закономерности поступления компонентов шихты из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи для различных условий загрузки, описанные математическими зависимостями. Они позволяют решать задачу локального воздействия на лимитирующие зоны и процессы. Наиболее высокие величины показателя равномерности поступления компонентов шихты из бункера на колошник – 0,74-0,77 обеспечивали размещением в бункере БЗУ окатышей между слоями агломерата, сформированными в количестве 25 и 75% от его расхода, располагающимися соответственно под и над окатышами; расположением коксового орешка, промывочных материалов в середине массы железорудного сырья.

3. Создана методика определения и использования относительной неравномерности распределения материалов и газов по окружности печи на основе  $\chi^2$ -статистики, используя квантили  $\chi_k^2$ -статистики для вычисления  $p = p(\chi_k^2)$ . Методика тестирована на доменных печах № 2, 4, 6 и 9 ПАО «ММК». Понижению коэффициента окружной неравномерности распределения температур на 10% соответствовало увеличение производительности доменных печей на 0,22% и понижение удельного расхода кокса на 0,41%.

4. Рассчитаны и экспериментально оценены режимы доменной плавки, обеспечивающие энерго-ресурсосбережение понижением коэффициента окружной неравномерности распределения температуры периферийных газов,

вычисленного по разработанной методике. Рациональное размещение железорудных и добавочных материалов в бункере БЗУ по пункту 2, стабилизация соотношений расходов природного газа и дутья по фурмам на доменных печах ПАО «ММК» позволила увеличить коэффициент замены кокса орешком с 0,68 до 0,91 кг/кг, снизить расход кокса увеличением потребления природного газа на 500 м<sup>3</sup>/ч, повысить степень использования СО на 2,8% отн. и Н<sub>2</sub> на 1,0% отн., понизить удельный расход кокса на 3,9 кг/т чугуна.

5. Выявлены закономерности распределения материалов и газов по радиусу колошника при различных режимах набора компонентов шихты в бункер БЗУ лоткового типа для локального воздействия на лимитирующие зоны и процессы. Повышением доли агломерата, поступающего в зону рудного гребня, с 45 до 70%, понижая его содержание на периферии путем увеличения в ней доли окатышей, уменьшили удельный расход кокса на 3,7 кг/т чугуна.

6. Обоснованы и исследованы режимы загрузки шихтовых материалов, обеспечивающие устранение искажений рабочего профиля доменной печи. Для удаления настыва в верхней части печи повышали долю окатышей в шихте с 30-35 до 50-55% и размещали их в пристеночной зоне колошника. Использование разработанного режима в течение 3-6 месяцев позволило уменьшить толщину настыва в среднем на 80 мм, что повысило производительность печей на 18,9 % и понизило удельный расход кокса на 5,8 %. Рост температуры холодильников шахты от увеличения доли окатышей на 1% в интервале их содержания 30-60% составил 1,1 °С.

7. Предотвращено излишнее истирание футеровки шахты, запечиков и распара доменных печей № 2, 4, 6 и 9 ПАО «ММК» для обеспечения рационального уровня температур их холодильников – 40-50 °С снижением рудной нагрузки в периферийной зоне и отдалением окатышей от футеровки изменением последовательности набора компонентов шихты в бункер БЗУ. Использование разработанного режима при постоянной доле окатышей, равной 38%, снизило среднюю температуру холодильников шахты доменной печи № 9 ПАО «ММК» на 3,4 °С. *(Разработанная технология удостоена серебряной медали лауреата*

*Международной промышленной выставки «МЕТАЛЛ-ЭКСПО» в 2017 году, см. приложение 22).*

8. Разработаны рациональные режимы загрузки материалов, формирующих гарнисаж в горне печи, обеспечивающие эффективное уменьшение тепловых нагрузок на холодильники в нижней части доменных печей, оснащенных БЗУ лоткового типа. Загрузка титаномагнетитовой руды в нижнюю часть бункера БЗУ и выпуск его содержимого в пристеночную зону печи № 2 ПАО «ММК» в течение 44 суток в количестве, обеспечивающем прирост содержания  $TiO_2$  в шлаке на 0,32%, а  $Ti$  в чугуна на 0,020% при конечном их содержании в продуктах плавки соответственно 1,16 и 0,099%, сопровождалось снижением величины плотности теплового потока по внутренним виткам холодильников на 14,8%.

9. Предложены и реализованы способы энергоресурсосбережения воздействием на параметры загрузки при работе доменных печей с верхней лимитирующей зоной по газодинамике. Уменьшение коэффициента сопротивления шихты движению газового потока в верхней части печи  $\lambda_b$  обеспечивали за счет рационального распределения по радиусу печи рудной нагрузки, железорудных и добавочных материалов в зависимости от их прочностных характеристик и температуры. В исследуемых периодах уменьшение  $\lambda_b$  на 5 % обеспечивало снижение рудной нагрузки в периферийной зоне на 5,91% в интервале 100-67%, повышение доли агломерата на 9,2% в интервале от 45 до 70% в зоне рудного гребня за счет уменьшения его доли на соответствующую величину в периферийной части печи, загрузка 8,2 кг/т чугуна коксового орешка в среду железорудного сырья с использованием приёмов равномерного его распределения по окружности. Реализация разработанных способов позволяла снижать удельный расход кокса до 9,4 кг/т чугуна.

10. Установлено, что при работе доменных печей ПАО «ММК» с нижней определяющей по газодинамике зоной рациональными режимами являются: загрузка промывочных материалов (марганцевая и (или) кремниземомарганцовистая руды, конвертерный шлак) к осевой зоне при поступлении кокса с

горячей прочностью по CSR менее 35 %, загрузка промывочных материалов в зону рудного гребня при величине CSR более 40%; равномерное распределение промывочных материалов по сечению и окружности при CSR в интервале 35 – 40 %, загрузка марганцевой руды при использовании в составе шихты кокса мелких фракций в количестве более 12 кг/т чугуна, исходя из соотношения 1,7 кг руды на 1 кг кокса мелких классов. Реализация преимуществ локальной загрузки марганцевой руды и конвертерного шлака в количестве 30-50 кг/т чугуна в зону горна доменных печей № 2, 6 ПАО «ММК» с наихудшей дренажной способностью коксовой насадки увеличивала их производительность на 1,5-3%.

11. Внедрена разработанная интерактивная система локального воздействия на лимитирующие зоны и процессы доменной плавки для энергоресурсосбережения путём повышения эффективности действия технологических параметров на печах № 2, 4, 6, 9, 10 ПАО «ММК», оснащенных бесконусными загрузочными устройствами лоткового типа.

12. Долевой экономический эффект от внедрения результатов хозяйственных НИР в производство ПАО «ММК» составил более 10 млн руб (см. приложения 23-27).

Полное использование разработок, протестированных успешными опытными плавками, обеспечивает экономический эффект около 200 руб./т чугуна.

13. Результаты диссертации внедрены в учебный процесс подготовки бакалавров и магистров по направлениям 22.03.02, 22.04.02 – Metallurgy, кадров высшей квалификации по направлению 22.06.01 – Technologies of materials in FGBOU VO «Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov».

### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы**

Положительные результаты лабораторных исследований и промышленных испытаний, внедрение научных результатов диссертационного исследования в ПАО «ММК» позволяет рекомендовать к продолжению исследований на других предприятиях РФ с учетом особенностей их работы.

### Список используемой литературы

1. Банных, О.А. О роли стали в 21-м веке // *Электromеталлургия*. – 2005. – № 5. – С. 6-13.
2. Исследование структуры и механических свойств высокопрочных конструкционных сталей / О.А. Банных, А.М. Сорокин, И.О. Банных, Е.И. Лукин // *Электromеталлургия*. – 2018. – № 2. – С. 2-7.
3. Григорович, К.В. XIV Международный конгресс сталеплавателей и производителей металла «Сталь в ногу со временем» / К.В. Григорович, А.Е. Сёмин // *Тяжелое машиностроение*. – 2017. – № 1-2. – С. 2-5.
4. Григорович, К.В. Настоящее и будущее технологий производства сталей XXI века / К.В. Григорович // *Сборник тезисов докладов V Международной конференции-школы по химической технологии XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии*. – 2016. – С. 45-47.
5. Состояние и перспективы производства ферросплавов в РФ / Л.И. Леонтьев, Л.А. Смирнов, В.И. Жучков, А.В. Жданов, В.Я. Дашевский, С.А. Гурова // *Металлург*. – 2015. – № 11. – С. 11-15.
6. Леонтьев, Л.И. О проблемах импортозамещения в горно-металлургическом комплексе // *Труды научно-практической конференции с международным участием и элементами школ молодых ученых «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР»*. – 2015. – С. 16-25.
7. Юсфин, Ю.С. *Металлургия железа* / Ю.С. Юсфин, Н.Ф. Пашков. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 464 с.
8. Некоторые теоретические аспекты технологии совместного вдувания природного газа и пылеугольного топлива / Л.А. Смирнов, Б.С. Тлеугабулов, С.А. Загайнов, К.Б. Пыхтеева, В.В. Филиппов, В.А. Михалев, К.В. Миронов // *Черная металлургия*. – 2016. – № 5 (1397). – С. 19-23.
9. *Металлургия чугуна* / Б.Н. Жеребин, А.Н. Похвиснев, Ю.С. Юсфин и др. – М.: Академия, 2004. – 774 с.

10. Андронов, В.Н. Современная доменная плавка / В.Н. Андронов – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 100 с.
11. Андронов, В.Н. Минимально возможный расход кокса и влияние на него различных факторов доменной плавки / В.Н. Андронов – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 142 с.
12. Юсфин, Ю.С. Определение минимально возможного расхода кокса на доменную плавку / Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов, А.Я. Травянов // *Металлург.* – 1998. – №4. – С. 22-25.
13. Тарасов, В.П. Теория и технология доменной плавки / В.П. Тарасов П.В. Тарасов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2007. – 384 с.
14. Перспектива использования природного и техногенного железорудного сырья в Российской Федерации / Т.И. Юшина, И.М. Петров, Г.И. Авдеев, И.О. Крылов, В.С. Валавин, С.Г. Пак, В.Н. Дунаева // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* – 2015. – № 2. – С. 416.
15. Инновационное решение проблем утилизации железосодержащих отходов металлургического производства / В.А. Роменец, С.А. Макеев, Ю.В. Похвиснев, В.С. Валавин, А.А. Федорова, А.И. Гиммельфарб, М.Я. Левин, В.И. Галкин // *Экономика в промышленности.* – 2011. – № 3. – С. 32-38.
16. Травянов, А.Я. Исследование возможностей ресурсосбережения при производстве чугуна на базе определения предельных показателей процессов производства: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 1999. – 27 с.
17. Применение инновационной технологии РОМЕЛТ для переработки железосодержащих отходов горно-металлургических предприятий / В.А. Роменец, В.С. Валавин, Ю.В. Похвиснев, С.А. Макеев, А.И. Гиммельфарб // *Металлург.* – 2010. – № 5. – С. 34-37.
18. Подгородецкий, Г.С. Современные направления развития и повышения энергоэкологической эффективности черной металлургии / Г.С. Подгородецкий, Л.А. Шульц // *Экология и промышленность России.* – 2016. – Т. 20. – № 4. – С. 46-52.

19. Никифоров, Г.В. Энергосбережение и управление энергосбережением в металлургическом производстве / В.К. Олейников, Б.И. Заславец. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 480 с.
20. Смирнов, Л.А. Уральскому институту металлов – 85 лет / Л.А. Смирнов, А.Ю. Ерцев // Сталь. – 2015. – № 11. – С. 2-5.
21. Качество управления и управление качеством на производстве. Ориентиры, проблемы, решения / Ю.С. Карабасов, А.И. Кочетов, Ю.А. Крупин, В.Б. Чупров // Сборник научных трудов II международной научно-практической конференции «Современная металлургия нового тысячелетия». – 2016. – С. 12-17.
22. Третьяк, А.А. Доменное производство России в 2011-2016 годы. Металлургия чугуна – вызовы XXI века: труды VIII международного конгресса доменщиков. М.: ООО «Типография КЕМ», 2016. – С. 121-34.
23. Курунов, И.Ф. Состояние и тенденции развития металлургии железа в свете вызовов XXI века. Металлургия чугуна – вызовы XXI века: труды VIII международного конгресса доменщиков. – М.: ООО «Типография КЕМ», 2016. – С. 121-34.
24. Тарасов, В.П. Загрузочные устройства шахтных печей. – М.: Металлургия, 1974. – 312 с.
25. Большаков, В.И. Об оценке распределителей шихты доменной печи / В.И. Большаков, С.Т. Плискановский // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2007. – № 3. – С. 12-14.
26. Крячко, Г.Ю. К вопросу об оценке работы распределителей шихты для доменной печи / Г.Ю. Крячко, С.Ю. Андриенко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2007. – № 1. – С.8-11.
27. Большаков, В.И. Исследование особенностей распределения шихтовых материалов в доменной печи / В.И. Большаков, Н.А. Гладков, Ф.М. Шутылеув, Т.П. Порубова // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2006. – № 6. – С. 7-10.
28. Большаков, В.И. Особенности применения различных загрузочных устройств на современных доменных печах / В.И. Большаков, И.Г. Товаровский,

Ф.М. Шутылев // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». – 2007. – № 9. – С. 24-32.

29. Распределение материалов по радиусу колошника и развитие процессов тепломассообмена и фазовых превращений в объеме доменной печи / В.И. Большаков, И.Г. Товаровский, Н.А. Гладков, Ф.М. Шутылев // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». – 2008. – № 3. – С. 22-34.

30. Большаков, В.И. Оценка эффективности применения загрузочных устройств на доменных печах / В.И. Большаков, И.Г. Товаровский, Ф.М. Шутылев // Сталь. – 2005. – № 7. – С.17-20.

31. Хейнерт, Г. Бесконусный засыпной аппарат для большой доменной печи / Г. Хейнерт, К.-Х. Петерс, Г. Риниклофф // Черные металлы. – 1973. – № 12. – С. 3-10.

32. Изава, Т. Современная эксплуатация и долговечность доменной печи в Японии / Т. Изава // Пер. Черметинформация. – 1984. – № 15269. – С. 10, I. Transaction ISIJ. – 1984. – V.24. – P. 425-434.

33. Суворов, М.Н. Оборудование и технологии компании Paul Wurth – путь к снижению себестоимости чугуна // Металлург. – 2009. – № 8. – С. 27-31.

34. Эволюция загрузочных устройств доменных печей / В.А. Шатлов, Ю.В. Серов, В.М. Федченко, Е.И. Ясаков // Сталь. – 1993. – № 8. – С. 5-11.

35. Большаков, В.И. Опыт создания конструкции и эксплуатации бесконусных загрузочных устройств // Сталь. – 1997. – № 6. – С. 13-18.

36. Технологические аспекты работы доменных печей с БЗУ “PAUL WURTH” / Р.С. Тахаутдинов, С.Н. Ушаков, В.И. Сединкин, А.Л. Мавров, А.В. Чевычелов, А.В. Павлов // Сталь. – 2008. – № 11. – С. 15-17.

37. Козин, Ю.А. О технологических резервах бесконусных загрузочных устройств доменных печей / Ю.А. Козин, Лазуткин С.Е. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1994. – № 9. – С. 6-9.

38. Промышленная эксплуатация лоткового загрузочного устройства доменной печи / А.В. Рыбцов, В.П. Лозовой, С.В. Поляничко, Е.И. Четыркин // Сталь. – 1992. – № 5. – С. 13-18.

39. Большаков, В.И. Об оценке эффективности применения бесконусных загрузочных устройств доменных печей / В.И. Большаков // *Металлург.* – 2010. – № 3. – С. 42-45.
40. Большаков, В.И. Теория и практика загрузки доменных печей / В.И. Большаков. – М.: *Металлургия*, 1990. – 256 с.
41. Большаков, В.И. Совершенствование способов загрузки доменных печей в СССР и за рубежом / В.И. Большаков, В.Л. Покрышкин, Ф.М. Шутылев // *Обзорная информация. Ин-т Черметинформация. Подготовка сырьевых материалов к металлургическому переделу и производство чугуна.* – Вып. 2. – М., 1983. – 32 с.
42. Большаков, В.И. Доменное производство “Криворожстали” / В.И. Большаков. – Днепропетровск: ИЧМ “Криворожсталь”, 2004. – 376 с.
43. Большаков, В.И. Обеспечение эффективной работы доменных печей, оснащенных бесконусными загрузочными устройствами / В.И. Большаков // *Доменное производство. Труды международного конгресса доменщиков.* – 2010. – С. 148-153.
44. Друкентанер, Г. Система оптимизации работы доменной печи «VAIRON» – экспертная система / Г. Друкентанер, Б. Шюрц, М. Шалер // *Черные металлы.* – 2000. – №6. – С. 64-72.
45. Большаков, В.И. Направления исследований и научных разработок института черной металлургии НАН Украины / В.И. Большаков // *Металлург.* – 2011. – № 1. – С. 11-13.
46. Большаков, В.И. Освоение доменных печей, оснащенных при реконструкции бесконусными загрузочными устройствами / В.И. Большаков, В.Л. Покрышкин // *Сталь.* – 1989. – № 11. – С. 8-13.
47. Опыт исследования системы загрузки современной доменной печи / В.И. Большаков, Н.Г. Иванча, В.Н. Логинов и др. // *Сталь.* – 1996. – № 10. – С. 2-5.
48. Вайсберг, Л.А. Совершенствование систем шихтоподготовки в доменном производстве / Л.А. Вайсберг, А.Н. Коровников, Г.С. Подгородецкий // *Черные металлы.* – 2017. – № 8. – С. 24-27.

49. Освоение технологии доменной плавки на печи, оборудованной бесконусным загрузочным устройством с лотковым распределителем шихты / А.А. Бачинин, А.Г. Попов, В.С. Поляничко, В.П. Лозовой, Е.И. Четыркин // Сталь. – 1993. – № 3. – С. 14-21.

50. Покрышкин, В.Л. Эффективность работы доменных печей различного полезного объема, оснащенных бесконусным загрузочным устройством / В.Л. Покрышкин, Ю.В. Рак // Сталь. – 1992. – № 7. – С. 8-15.

51. Покрышкин, В.Л. Оценка эффективности использования технологических возможностей БЗУ по данным тепловых и материальных балансов / В.Л. Покрышкин, Ю.В. Рак, Н.Е. Ходотова // Сталь. – 1989. – № 4. – С. 10-14.

52. Курунов, И.Ф. К вопросу об эффективности применения на доменных печах различных загрузочных устройств / И.Ф. Курунов // Metallurg. – 2009. – № 11. – С. 34-41.

53. Выбор типа бесконусного загрузочного устройства для доменных печей / В.Г. Дружков, А.В. Иванов, И.Е. Прохоров, Н.А. Майстренко, А.С. Харченко // Черные металлы. – 2013. – № 11. – С. 9-13.

54. Тарасов, П.В. К вопросу эффективности работы доменных печей, оборудованных конусными и бесконусными загрузочными устройствами / П.В. Тарасов, Л.В. Быков // Черная металлургия. – 2007. – № 3. – С. 11-15.

55. Тарасов, В.П. Газодинамические параметры и показатели работы доменных печей при загрузке шихты типовым конусным и бесконусным загрузочным устройством / В.П. Тарасов, П.В. Тарасов, Л.В. Быков // Сталь. – 2005. – № 1. – С. 6-10.

56. Тарасов, П.В. Распределение материалов и газов по окружности доменной печи / В.П. Тарасов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2007. – № 5. – С. 17-22.

57. Работа доменных печей ПО МК АЗОВ-СТАЛЬ с равномерным окружным распределением шихты и газов / Р.С. Сидорчук, А.Н. Батищев,

Э.О. Цкитишвили, В.П. Тарасов, Р.В. Ковальчик, С.В. Кривенко, Д.И. Гаврилоглу // *Металлургия*. – 2013. – №9. – С. 38-41.

58. Бардин, И.П. Доменное производство: справочник. Том 2 / И.П. Бардин. – М.: Metallurgizdat, 1963. – 650 с.

59. Павлов, М.А. *Металлургия чугуна. Часть II.* / М.А. Павлов. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит. по черн. и цв. металлургии, 1945. – 492 с.

60. Готлиб, А.Д. Доменный процесс / А.Д. Готлиб. – М.: *Металлургия*, 1966. – 504 с.

61. Рамм, А.Н. Современный доменный процесс / А.Н. Рамм. – М.: *Металлургия*, 1980. – 303 с.

62. Жеребин, Б.Н. Практика ведения доменной печи / Б.Н. Жеребин. – М.: *Металлургия*, 1980. – 248 с.

63. Тарасов, П.В. Распределение материалов и газов по окружности доменной печи / П.В. Тарасов // *Черная металлургия*. – 2007. – №5. – С. 17-22.

64. Huatao, Zhao. Uneven distribution of burden materials at blast furnace top with parallel bunkers / Zhao Huatao, Zhu Minghua, Du Ping // *ISIJ International* 2012. – Vol. 52. – № 12. – P. 2177-2185.

65. Nakano, Kaoru. Advanced Supporting System for Burden Distribution Control at Blast Furnace Top. / Kaoru Nakano, Kohei Sunahara, Takanobu Inada. // *ISIJ International*. – 2010. – Vol. 50. № 7. – P. 994-999.

66. Teng, Zhao-jie. Mathematical model of burden distribution for the bell-less top of a blast furnace / Zhao-jie Teng, Shu-sen Cheng, Peng-yu Du, Xi-bin Guo // *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. – 2013. – Vol. 20. – Issue 7. – P. 620-626.

67. Харченко, А.С. Закономерности поступления компонентов шихты по крупности из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи в зависимости от условий загрузки / А.С. Харченко. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2018. – Т.16. – №3. – С. 46-56.

68. Анализ особенностей формирования порций и истечения материалов из бункера БЗУ при загрузке шихты / К.Б., Пыхтеева, С.А. Загайнов,

Б.С. Глеугабулов, В.В. Филиппов, Д.Л. Журавлев, Ф.П. Николаев // Сталь. – 2008. – № 6. – С. 14-19.

69. Влияние расхода конвертерного шлака на показатели работы доменных печей / А.А. Полинов, А.В. Павлов, Г.Н. Логачёв, О.П. Онорин, Н.А. Спирин // Metallurg. – 2017. – № 4. – С. 41-47.

70. Работа доменных печей ОАО «ММК» с высокой долей окатышей в шихте. Часть 1 / А.В. Павлов, О.П. Онорин, Н.А. Спирин, А.А. Полинов // Metallurg. – 2016. – № 6. – С. 36-42.

71. К вопросу о качестве железорудных материалов / Н.М. Можаренко, Н.А. Гладков, А.С. Нестеров и др. // Сталь. – 1997. – № 8. – С. 3-5.

72. Mousa, E. Reduction of Pellets-Nut Coke Mixture under Simulating Blast Furnace Conditions / E. Mousa, D. Senk, A. Babich // Steel Research International. – 2010. – Vol. 81. – Issue 9. – P. 706-715.

73. Mousa, E. Einfluss von Brechkoks auf das Reduktionsverhalten von Eisenerzsinter / E. Mousa, D. Senk, A. Babich // Tagungsband zum 24. Aachener Stahlkolloquium Metallurgie, «Rohstoffe-Werkstoffe-Gesellschaft», 17-18.09.2009, Aachen. – Aachen: Mainz, 2009. – P. 67-77.

74. Watakabe, S. Development of high ratio coke mixed charging technique to the blast furnace / S. Watakabe, K. Takeda, H. Nishimura, S. Goto, N. Nishimura, T. Uchida, M. Kiguchi // ISIJ International. – 2006. – Issue 4. – P. 513–522.

75. Особенности распределения материалов в доменной печи объемом 5000 м<sup>3</sup> с бесконусным загрузочным устройством / В.Л. Покрышкин, В.И. Большаков, И.Т. Хомич и др. // Сталь. – 1982. – №11. – С. 13-16.

76. Исследование работы доменной печи с усовершенствованной винтовой загрузкой шихтовых материалов / А.П. Фоменко, Н.В. Крутас, А.В. Казьмин и др. // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2011. – № 1. – С. 10-12.

77. Освоение оборудования систем загрузки доменных печей с бесконусным загрузочным устройством / В.И. Большаков, А.Ю. Зарембо, Н.Г. Иванча, Ф.М. Шутылев // Сталь. – 1997. – № 1. – С. 4-9.

78. Исследование распределения шихты и газового потока доменной печи большого объема при использовании БЗУ / В.И. Большаков, С.Т. Шулико, В.В. Канаев, Ф.М. Шутылев, В.В. Логинов // *Металлург.* – 1997. -№12. – С. 16-17.

79. Определение рациональной длины распределительного лотка загрузочного устройства доменной печи объемом 5500 м<sup>3</sup> / В.И. Большаков, А.К. Икконен, В.И. Нетронин, А.Ю. Зарембо // *Сталь.* – 1995. – №5. – С. 25-28.

80. Большаков, В.И. О влиянии расположения лотка БЗУ в колошниковом пространстве на показатели работы доменной печи / В.И. Большаков // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2010. – №6. – С. 83-84.

81. Большаков, В.И. Траектории движения шихты в колошниковом пространстве современной доменной печи / В.И. Большаков, А.Ю. Зарембо // *Черная металлургия.* – 1985. – Вып. 20 (1000). – С. 35-37.

82. Тарасов, В.П. Поле скоростей в слое шихты на колошнике при загрузке доменной печи / В.П. Тарасов, В.П. Грызун // *Сталь.* – 1996. – №5. – С. 3-5.

83. Сибэгатуллин, С.К. Качество шихтовых материалов доменной плавки, включающих титаномагнетиты и сидериты: учеб. пособие / С.К. Сибэгатуллин, А.С. Харченко. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та. им. Г.И. Носова, 2012. – 150 с.

84. Освоение режимов загрузки доменной печи, оборудованных БЗУ, в условиях нестабильного качества шихтовых материалов / В.И. Большаков, Ю.С. Семенов, Е.И. Шумельчик и др. // *Сб. трудов VI Международного конгресса по аглококсодоменному производству.* – 20-24 мая. – 2013. – С. 60-71.

85. Истечение материалов из шихтового бункера лоткового загрузочного устройства доменной печи по видам крупности / С.К. Сибэгатуллин, А.С. Харченко, С.И. Гаврюшкин, и др. // *Теория и технология металлургического производства.* – 2009. – №9. – С. 21-25.

86. Семенов, Ю.С. Выбор рациональных режимов загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ, для условий работы с малой массой подачи и с

нестабильным качеством шихтовых материалов / Ю.С. Семенов // Черная металлургия. – 2013. – № 12. – С. 14-19.

87. Методика определения рациональных параметров формирования железорудных смешанных порций при загрузке шихтовых материалов в доменную печь / В.И. Большаков, Н.Г. Иванча, И.Г. Муравьева, В. И. Вишняков // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – №5. – С. 83-88.

88. Управление распределением гранулометрического состава порций шихты на доменном конвейере / В.И. Большаков, Н.Г. Иванча, В.А. Улахович, В.Г. Банцаревич // Сталь. – 1989. – № 5. – С. 13-16.

89. Предпусковые исследования загрузки и распределения шихты в доменной печи большого объема / В.И. Большаков, Ю.А. Богачев, В.И. Вишняков и др. // Черная металлургия. – 2008. – № 6. – С. 14-19.

90. Бочка, В.В. Исследование некоторых особенностей истечения материалов из бункера БЗУ / В.В. Бочка, Н.Ш. Гринштейн, В.В. Тарановский // Сталь. – 1994. – № 7. – С. 11-14.

91. Бачинин, А.А. Исследование процесса загрузки и выгрузки шихтовых бункеров бесконусных загрузочных устройств доменных печей / А.А. Бачинин, А.Л. Брусов // Сталь. – 1989. – № 7. – С. 10-12.

92. Сibaгатуллин, С.К. Влияние последовательности загрузки компонентов шихты в бункер БЗУ на равномерность их поступления в колошниковое пространство доменной печи / С.К. Сibaгатуллин, Е.О. Теплых, А.С. Харченко // Теория и технология металлургического производства. – 2011. – № 11. – С. 12-16.

93. Сibaгатуллин, С.К. Формирование слоя шихты в колошниковом пространстве печи: учеб. пособие / С.К. Сibaгатуллин. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та. им. Г.И. Носова, 2014. – 188 с.

94. Сегрегация частиц шихты в колошниковом пространстве доменной печи, оборудованной бесконусным загрузочным устройством / Е.М. Танчик, З.А. Родионенко, М.Н. Горбачев, Г.И. Семенова // Черная металлургия: бюллетень ин-та «Черметинформация». – 1990. – № 8. – С. 52-53.

95. Тарасов, В.П. Сегрегация материалов по радиусу колошника доменной печи / В.П. Тарасов, В.П. Грызун // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1990. – № 5. – С. 20-22.

96. Исследование кластерной структуры шихтовых материалов доменной плавки на основе измерения их электрического сопротивления / В.А. Доброскок, Д.С. Кокорин, Р.А. Михин, Ю.С. Юсфин // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2010. – № 3. – С. 3-5.

97. Большаков, В.И. Научное обоснование стратегии управления распределением шихты при использовании БЗУ / В.И. Большаков // Сталь. – 2002. – №4. – С. 37-42.

98. Заблоцкий, П.А. Методика численной оптимизации параметров загрузки доменной печи с применением трёхфакторной математической модели / П.А. Заблоцкий, В.А. Петренко, В.Н. Ковшов // Металлург. – 2017. – №3. – С. 15-18.

99. Кац, М.Д. Математическое моделирование и оптимизация технологического режима доменной плавки по информации, фиксируемой в режиме нормальной эксплуатации / М.Д. Кац, А.М. Давиденко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2007. – №3. – С. 15-20.

100. Оптимизация загрузки многокомпонентной шихты с использованием БЗУ / С.А. Загайнов, С.В. Филатов, В.В. Филиппов, Б.С. Глеугабрулов, К.Б. Пыхтеева // Доменное производство 21 век: Труды международного конгресса доменщиков. – Москва. – 12-16 апреля. – 2010. – С. 103-105.

101. Грачев, Ю.М. Новый подход к решению задачи повышения эффективности доменной плавки одновременно по удельному расходу кокса и производительности / Ю.М. Грачев, М.Д. Кац, А.М. Давиденко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2008. – №5. – С. 142-145.

102. Большаков, В.И. Прогнозирование теплового состояния горна доменной печи / В. И. Большаков, И. Г. Муравьева, Ю. С. Семенов // Сталь. – 2009. – №5. – С. 7-9.

103. Управление газораспределением в доменной печи, оборудованной бесконусным загрузочным устройством. / В.И. Большаков, Н.А. Рослик, Ф.М. Шутылев, С.Т. Шулико, В.Н. Логинов // Сталь. – 1995. – №7. – С. 15-19.

104. Пат. 2022025 РФ, кл. С21В 7/20. Способ загрузки доменной печи / В.И. Большаков, Н.А. Рослик, Ф.М. Шутылев, А.К. Икконен и др.; опубл. 30.10.1994.

105. Пат. 2015169 РФ, кл. С21В 7/20. Способ управления окружным распределением шихтовых материалов на колошнике доменной печи / В.И. Большаков, Н.А. Рослик, А.Ю. Зарембо; опубл. 30.06.1994.

106. Большаков, В.И. Рациональный режим работы вращающегося распределителя шихты бесконусного загрузочного устройства / В.И. Большаков, Ф.М. Шутылев // Сталь. – 1988. – № 3. – С. 17-20.

107. Большаков, В.И. Технология загрузка доменных печей, оснащенных бесконусными загрузочными устройствами / В.И. Большаков // Metallurgical and Iron and Steel Industry. – 1998. – №3. – С.6-12.

108. Воронцов, В.В. К вопросу о распределении шихтовых материалов по окружности колошника доменной печи / В.В. Воронцов, А.Т. Степанов // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2010. – № 1. – С. 129-133.

109. Компенсация конструктивных особенностей БЗУ на окружное распределение шихты в печи / В.И. Большаков, И.Е. Варивода, Ф.М. Шутылев, Н.А. Рослик // Сталь. – 1997. – № 6. – С. 25-28.

110. Контроль радиального газораспределения в оборудованных БЗУ доменных печах ММК с помощью многоточечных термозондов / В.М. Паршаков, Р.С. Тахаутдинов, Ю.А. Бодяев, М.Ф. Гибадуллин, Л.С. Канин // Сталь. – 2009. – №10. – С. 16-19.

111. Тарасов, В.П. Определение газовых потоков потерь их напора по радиусу доменной печи / В.П. Тарасов, П.В. Тарасов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2006. – №1. – С. 10-18.

112. Оптимизация состава и режима загрузки шихтовых материалов с целью повышения эффективности доменной плавки / В.И. Большаков, Н.А. Гладков, Ф.М. Шутылев, Д.Н. Тогобицкая // Сталь. – 2001. – №4. – С. 6-10.

113. Анализ распределения шихтовых материалов на доменных печах, оснащенных БЗУ / В.И. Большаков, Н.А. Гладков, Т.П. Порубова, Ф.М. Шутылев // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2007. – №1. – С. 5-8.

114. Совершенствование распределения шихты доменной печи №6 ОАО НЛМК / В.И. Большаков, А.Н. Арзамасцев, В.В. Лебедь, А.А. Жеребецкий // Сталь. – 2013 – №1. – С. 2-5.

115. Тарасов, В.П. Определение рациональных размеров центральной высокопроницаемой зоны шихты на основе анализа работы доменной печи №3 комбината «Запорожсталь» / В.П. Тарасов // Сталь. – 1992. – №5. – С. 18-21.

116. Логинов, В.И. О размере центральной «отдушины» столба шихтовых материалов в доменной печи / В.И. Логинов, К.А. Мусиенко, А.Д. Гончаров // Сталь. – 1989. – №12. – С. 13-17.

117. Большаков, В.И. Оптимизация программ загрузки доменной печи лотковым распределителем / В.И. Большаков, В.Л. Покрышкин, Ф.М. Шутылев // Сталь. – 1985. – № 9. – С. 16-20.

118. Эффективность распределения окатышей в шихте доменных печей / В.И. Большаков, Н.А. Гладков, Ф.М. Шутылев, Ю.А. Богачев // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – №6. – С. 11-15.

119. Большаков, В.И. Совершенствование распределения окатышей по сечению доменной печи / В.И. Большаков, Н.А. Гладков, Ф.М. Шутылев // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2003. – №1. – С. 12-15.

120. Гуденау, Г.В. Влияние пластичной зоны на распределение газового потока в доменной печи / Г.В. Гуденау, К. Крайбих, Ё. Номия // Черные металлы. – 1979. – №22. – С. 7-13.

121. Рощин, В.Е. Физическая интерпретация теории восстановления окисления металлов / В.Е. Рощин, А.В. Рощин // Вестник Южно-Уральского

государственного университета. Серия: Metallургия. – 2016. – Т. 16. № 4. – С. 29-39.

122. Роцин, В.Е. Физика процессов окисления и восстановления металлов в твердой фазе / В.Е. Роцин, А.В. Роцин // Металлы. – 2015. – № 3. – С. 19-25.

123. Влияние интенсивности доменной плавки на расход топлива и кинетику химических реакций восстановительного процесса / Г.В. Коршиков, В.Н. Титов, В.Г. Михайлов и др. // Сталь. – 2016. – № 2. – С. 9-15.

124. Влияние химических процессов на термодинамические параметры газового потока в доменной печи / Г.В. Коршиков, В.Н. Титов, В.Г. Михайлов и др. // Сталь. – 2016. – № 6. – С. 2-9.

125. Любан, А.П. Исследование доменного процесса / А.П. Любан. – М.: Metallургиздат, 1948. – 200 с.

126. Совершенствование распределения рудных нагрузок на основе комплексного анализа процессов в объеме доменной печи / И.Г. Товаровский, В.И. Большаков, Д.Н. Тогобицкая, А.Ф. Хамхотько // Черная металлургия. – 2008. – №7. – С. 10-15.

127. Товаровский, И.Г. Выбор рациональных параметров распределения шихты на колошнике экспериментально-аналитическим методом / И.Г. Товаровский, В. И. Большаков, Ф.М. Шутылев // Черные металлы. – 2007. – С. 13-19.

128. Товаровский, И.Г. Прогнозная оценка влияния распределения шихтовых материалов по радиусу колошника на процессы и показатели доменной плавки / И.Г. Товаровский // Metallург. – 2014. – №8. – С. 46-52.

129. Товаровский, И.Г. Методика численного анализа процессов доменной плавки в радиальных кольцевых сечениях по высоте печи / И.Г. Товаровский, В.И. Большаков // Черные металлы. – 2006. – № 3. – С. 23-29.

130. Влияние режима загрузки доменной печи на условия теплообмена и восстановления / А.Л. Берин, А.П. Пухов, М.А. Цейтлин, И.Ш. Туктамышев // Сталь. – 1993. – №5. – С. 12-17.

131. Распределение шихты и газов доменной печи и степень использования природного газа в процессе плавки. / Б.Ф. Мардер, Л.Н. Швец, Г.А. Воловик, Ю.И. Трипонец, П.Г. Калашнюк // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1998. – №1. – С. 11-15.

132. Тарасов, В.П. Определение газовых потоков потерь их напора по радиусу доменной печи / В.П. Тарасов, П.В. Тарасов // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2006. – №1. – С. 10-18.

133. Товаровский, И.Г. Аналитическое исследование влияние распределения рудных нагрузок на показатели плавки / И.Г. Товаровский, В.И. Большаков // *Сталь*. – 2006. – №10. – С. 7-12.

134. Дмитриев, А.Н. Математическое моделирование доменного процесса / А.Н. Дмитриев. – Екатеринбург: УРО РАН, 2011. – 162 с.

135. Ченцов А.В., Балансовая логико-статистическая модель доменного производства / А.В. Ченцов, Ю.А. Чесноков, С.В. Шаврин. – Екатеринбург.: УРО РАН, 2003. – 176 с.

136. Китаев, Б.И. Теплообмен в доменной печи / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Б.Л. Лазарев. – М.: Металлургия, 1966. – 355 с.

137. Теплотехника доменного производства / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Е.Л. Суханов и др. – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.

138. Дмитриев, А.Н. Двумерная математическая модель доменного процесса / А.Н. Дмитриев, С.В. Шаврин // *Сталь*. – 1996. – №12. – С. 7-13.

139. Большаков, В.И. Модель радиального распределения шихтовых материалов на колошнике доменной печи, оборудованной БЗУ / В.И. Большаков, Ю.С. Семенов, В.В. Лебедь // *Сб. науч. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»*. – 2010. – Вып. 23. – С.52-61.

140. Совершенствование режимов загрузки и дутья на доменных печах ПАО МК «АЗОВсталь» / Д.А. Тонких, С.А. Кариков, А.К. Тараканов и др. // *Металлург*. – 2013. – № 9. – С. 42-48.

141. Модельная система выбора и корректировки программ загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ / Ю.С. Семенов, Т.В. Шумельчик, Т.В. Вишняков и др. // *Металлург.* – 2012. – № 9. – С. 36-40.

142. Разработка технологии распределения шихты для доменной печи «Е» на заводе Гамильтон фирмы «United States Steel» в Канаде / Yongfu Zhao, Jerry C. Caro, Steven J. McKnight и др. // *Новости черной металлургии за рубежом.* – 2012. – № 2. – С. 22-28.

143. Современные технологии загрузки доменных печей / Й. Бухвальдер, В.А. Доброскок, Э. Лонарди, Р. Гоффин, Г. Тиллен, С. Кёлер // *Черные металлы.* – 2008. – № 9. – С. 21.-25.

144. Ковшов, В.Н. Теоретическое определение степени использования газового потока с помощью математических моделей распределения шихты и газа по радиусу колошника доменной печи / В.Н. Ковшов, П.А. Заблоцкий, Д.П. Карауш // *Теория и практика металлургии.* – 2013. – №3-4. – С. 3-6.

145. Исследование распределения шихты при бесконусной загрузке доменной печи Hyundai steel / Oh Han-Sang, W.S., Choi, H. J. Yoon, S. S. Yoon // *METEC Trade fair and 2 European Steel Technology and Application Days Conference.* – 2015. – P. 6.

146. Сувовров, М.Н. Современное оборудование доменной печи для работы с высокой производительностью при длительной кампании / М.Н. Сувовров // *Металлургия чугуна – вызовы XXI века: труды VIII международного конгресса доменщиков.* – М.: ООО «Типография КЕМ», 2016. – С. 59-67.

147. Товаровский, И.Г. Анализ критериев оценки распределения шихтовых материалов и газов по радиусу доменной печи // *Черная металлургия.* – 2012. – №12. – С. 33-38.

148. Критерий режима загрузки доменной печи / В.И. Большаков, Н.А. Гладков, Ф.М. Шутылев, С.Т. Шулико // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2001. – №6. – С. 5-8.

149. Исследование теоретических основ распределения шихтовых материалов в доменной печи / В.И. Большаков, Н.А. Гладков, С.Т. Шулико, Ф.М. Шутылев // Сталь. – 2002. – №12. – С. 5-10.

150. Большаков, В.И. Развитие подходов к совершенствованию режимов загрузки доменных печей шихтовыми материалами / В.И. Большаков, Н.А. Гладков, Ф.М. Шутылев // Труды V-го Международного конгресса доменщиков. Днепропетровск-Кривой Рог. 7-12 июня 1999 г. – Днепропетровск: Пороги, 1999. – С. 236-238.

151. Большаков, В.И. Влияние параметров загрузки и качества железорудных материалов на степень использования газов в доменной печи / В.И. Большаков, Н.А. Гладков, Ф.М. Шутылев // Metallurgical and Iron and Steel Industry. – 2001.- №1.-С.10-14.

152. Влияние смешивания рудного сырья с коксом на газодинамические условия и технико-экономические показатели доменной плавки / В.И. Логинов, А.Л. Берин, С.М. Соломатин и др. // Сталь. – 1977. – № 5. – С. 391-394.

153. Работа доменной печи при совместной загрузке железорудных материалов и кокса в скип / В.И. Логинов, К.А. Мусиенко, Д.В. Воронков и др. // Сталь. – 1987. – № 12. – С. 7-12.

154. Большаков, В.И. Применение БЗУ и совершенствование системы автоматизированного управления загрузкой доменных печей // Сталь. – 1994. – № 5. – С. 16-20.

155. Шепетовский, Э.А. Освоение технологии плавки при загрузке лотковым распределителем части железорудных материалов в смеси с коксом // Э.А. Шепетовский, А.М. Гавриков, Ю.В. Савастьянов // Сталь. – 1989. – № 11. – С. 13-17.

156. Смоляк, В.А. Выплавка ферромарганца в доменной печи с применением кокса мелкой фракции / В.А. Смоляк, Ю.Ф. Яшин, Б.Ф. Щербицкий // Metallurgical and Iron and Steel Industry. – 1971. – № 3. – С. 8-10.

157. Технология и эффективность использования кокса мелких фракций в доменной плавке / А.Н. Рыженьков, В.Е. Попов, А.Н. Ковалев, С.Л. Ярошевский, Н.С. Хлапонин, А.В. Кузин // Труды международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию КГГМК «Криворожсталь» «Теория и практика производства чугуна». – Кривой Рог: КГГМК «Криворожсталь», 2004. – С. 374-378.

158. Использование в доменных печах мелкокускового кокса / М. Танка, К. Мията, Р. Коно и др. // Новости черной металлургии за рубежом. – 1996. – № 3. – С. 40-41.

159. Качество коксового орешка в современных условиях его производства / И.В. Фешкова, А.Д. Рябиченко, В.С. Швед, В.И. Алешин, В.А. Венс, И.М. Кашлев // Кокс и химия. – 1998. – № 9. – С.26-30.

160. Близников, В.С. Доменное производство Японии в новом столетии, исследования и технические разработки / В.С. Близников // Новости черной металлургии за рубежом. – 2007. – № 4. – С. 22-31.

161. О возможности использования мелкого кокса в современной доменной технологии / И.И. Коробов, И.И. Котов, С.И. Пинчук и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1969. – № 5. – С. 40-43.

162. Промышленный опыт и эффективность использования коксового орешка в смеси с железорудной шихтой / С.Л. Ярошевский, А.М. Кузнецов, В.П. Падалка и др. // Металл и литье Украины. – 2005. – № 6. – С. 3–6.

163. Шепетовский, Э.А. Рациональная организация структуры столба шихты / Э.А. Шепетовский // Труды третьего международного конгресса по агло-коксо-доменному производствам «Проблемы доменного производства в современных экономических условиях работы горно-металлургического и топливно-энергетического комплексов». – Украина, Ялта. – 2010. – С. 227-235.

164. Николаев, К.А. Пути снижения расхода кокса на Алчевском металлургическом комбинате / К.А. Николаев // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». – 1993. – № 4. – С. 25-27.

165. Производство и использование коксового орешка в доменной плавке / С.Л. Ярошевский, Н.С. Хлапонин, А.М. Кузнецов, А.В. Кузин. – Донецк: УНИТЕХ, 2006. – 68 с.

166. Подготовка кокса к доменной плавке на современном этапе развития доменного производства в Украине. / А.В. Кузин, С.Л. Ярошевский, А.М. Кузнецов и др. // Сб. науч. тр. «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Вып. 16. – Днепропетровск: ИЧМ им. З.И. Некрасова НАН Украины, 2008. – С. 196-204.

167. Эффективность использования кокса фракции менее 40 мм в доменной плавке / С.Л. Ярошевский, В.А. Ноздрачев, А.П. Чеботарев и др. // Металлург. – 2000. – № 12. – С. 32-35.

168. Производство первичного металла в странах Западной Европы / А.И. Бабич, В.В. Кочура, А. Формсо, Л. Гарсия // Металл и литье Украины. – 1997. – № 5. – С. 41-44.

169. Применение коксового орешка в доменной печи [Stosowanie koksu orzecha II w wielkim piecu] // Niesler Marian 5 Międzynarodowa sesja naukowa “Nowe technologie i inżynierii materialowej”, Czestochowa: Wyd. Wydz. inż, process, mater. i fizstos Politechn. Czestochow. 2004. С. 14-17.

170. Патент 2042714 РФ. Способ загрузки в доменную печь твердой топливной добавки / В.А. Доброскок, И.Ф. Курунов, Ю.В. Липухин и др., 1993.

171. Разработка режима загрузки и опыт применения мелкофракционного кокса в мощной доменной печи / В.А. Доброскок, Ю.В. Липухин, И.Ф. Курунов, В.Н. Логинов // Сталь. – 1998. – № 8. – С. 7-13.

172. Влияние мелких фракций кокса на показатели доменной плавки / В.А. Долинский, Л.Д. Никитин, В.П. Горбачев, П.В. Портнов, К.И. Доминин // Вестник горно-металлургической секции российской академии естественных наук. Отделение металлургии: сб. науч. тр. Вып. № 23. – М.: Новокузнецк: СибГИУ, 2009. – С. 33-38.

173. Работа доменных печей с использованием кокса мелких фракций / Л.Д. Никитин, М.Ф. Марьясов, В.П. Горбачев, С.Ф. Бугаев, Ю.М. Денисов // *Металлург.* – 1999. – № 1. – С. 38–39.

174. Использование коксовой мелочи в доменных печах ОАО «ММК» / С.Н. Пишнограев, А.В. Чевычелов, В.А. Гостенин, Н.С. Штафиенко, В.П. Гридасов // *Сталь.* – 2009. – №10. – С.6-9.

175. А.с. 1708856А1 СССР. Способ снижения удельного расхода кокса / Н.Т. Данаев, А.Г. Захаров, Г.М. Никитин, 1989.

176. Пат. 2092564 РФ. Способ загрузки доменной печи / АОО «Северсталь», Московский государственный институт стали и сплавов (технологический университет); 1997.

177. Пат. 2157411 РФ. Способ выплавки предельного чугуна в доменной печи / Э.Д. Бабаев, В.П. Хайдуков, А.А. Надежин и др.; 2000.

178. Пат. 2187558 РФ. Способ ведения доменной плавки / АОО «Северсталь»; 2002.

179. Пат. 2228362 РФ. Способ доменной плавки / Б.М. Раковский, Б.С. Романова; 2004.

180. Пат. 2207381 РФ. Способ выплавки чугуна в доменной печи / В.С. Лисин, В.Н. Скороходов, А.Н. Скороходов и др.; 2003.

181. Пат. 2308490 РФ. Способ ведения доменной плавки / В.Н. Логинов, М.Ю. Суханов, Л.Е. Васильев; 2007.

182. Опыты по применению кокса различной крупности в доменных печах / В. Айзентух, К. Энгель, В. Крафт и др. // *Черные металлы.* – 1979. – № 2. – С. 25-30.

183. Тайхерт, Э. Влияние различной крупности кокса на режим работы доменной печи с горном 7,8 м / Э. Тайхерт, В.Н. Гупта // *Черные Металлы.* – 1976. – № 14. – С. 19-23.

184. Оценка влияния на доменную плавку кокса фракции менее 40 мм / Н.П. Сысоев, С.К. Сибатуллин, В.К. Кропотов, В.В. Вейнский, В.Л. Терентьев,

В.П. Ташлинцев // Труды V международного конгресса доменщиков. – Днепропетровск: Пороги, 1999. – С. 216–218.

185. Пат. 2167202 РФ. Способ ведения доменной плавки / ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат»; 2001.

186. Ярошевский, С.Л. Эффективность применения коксового орешка в доменной плавке / С.Л. Ярошевский, В.А. Ноздрачев, А.М. Кузнецов // Металл и литье Украины. – 2000. – № 5. – С. 9–13.

187. Горин, Д.В. Исследование процесса получения и эффективность применения коксового орешка в доменной плавке / Д.В. Горин, А.В. Храпко, А.В. Кузин // Металлургические процессы и оборудование. – 2011. – № 3. – С. 10-16.

188. Эффективность технологии доменной плавки при использовании в шихте коксового орешка / С.Л. Ярошевский, А.М. Кузнецов, В.П. Падалка, В.С. Хлапонин, А.В. Кузин // Сталь. – 2006. – № 3. – С. 2-6.

189. Шепетовский, Э.А. Рациональное формирование столба шихты в доменной печи / Э.А. Шепетовский // Сталь. – 2003. – № 5. – С. 11-15.

190. Кузин, А.В. Коксовый орешек – компенсирующее мероприятие для улучшения газопроницаемости «сухой» зоны доменной печи / А.В. Кузин // Наука Праці. Донецького національного університету. – 2007. – № 9. – С. 31-41.

191. Кузин, А.В. Аналитическое исследование влияния кокса мелких фракций на газопроницаемость «сухой» зоны доменной печи / А.В. Кузин, С.Л. Ярошевский, Н.С. Хлапонин // Труды международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию КГГМК «Криворожсталь» «Теория и практика производства чугуна». – Кривой Рог: КГГМК «Криворожсталь», 2004. – С. 369-374.

192. Кузин, А.В. Анализ влияния введения коксового орешка в железорудную часть шихты на зону когезии / А.В. Кузин // Черная металлургия: бюллетень ин-та «Черметинформация». – 2009. – № 12. – С. 31-34.

193. Кузин, А.В. Поведение железорудных материалов в зоне когезии при загрузке их в смеси с коксовым орешком / А.В. Кузин // Металлургические процессы и оборудование. – 2010. – № 3. – С. 4-7.

194. Моуса, Э. Восстановление агломерата и окатышей в смеси с косовым орешком // Э. Моуса, А. Бабич, Д. Сенк // Черная металлургия: бюллетень ин-та «Черметинформация». – 2010. – № 10. – С. 34- 44
195. Фиалков, Б.С. Управление истечением сыпучих материалов / Б.С. Фиалков, В.Т. Плицин, В.Е. Максимов. Алма-Ата: Наука КазССР, 1981. – 148 с.
196. Лукьянов, П.И. Аппараты с движущимся зернистым слоем / П.И. Лукьянов– М.: Машиностроение, 1974. – 184 с.
197. Каталымов, А.В. Дозирование сыпучих и вязких материалов / А.В. Каталымов, В.А. Любартович. – Л.: Химия, 1990. – 240 с.
198. Кирия, Р.В. Описание процесса истечения сыпучего груза из бункера с помощью структурно-механических моделей / Р.В. Кирия // Системные технологии. – 2009. – № 3. – С. 3-19.
199. Большаков, В.И. Особенности истечения шихтовых материалов из бункера бесконусного загрузочного устройства / В.И. Большаков, А.Ю. Зарембо // Металлургия и коксохимия. – Киев: Техника, 1985. – Вып. 88. – С. 31-34.
200. Большаков, В.И. Методика расчета параметров схода шихты с распределительного лотка / В.И. Большаков, А.Ю. Зарембо, А.С. Сало // Вопросы производства чугуна в доменных печах. МЧМ СССР (И.Ч.М.). – М.: Металлургия, 1984. – С. 60-64.
201. Прошунин, Ю.Е. О математической модели истечения сыпучего материала из аппарата / Ю.Е. Прошунин // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1995. – № 8. – С. 10-16.
202. Клоцман, Е.Я., Исследование связи процессов истечения шихтовых материалов из весовых бункеров шихтоподачи и бункеров бесконусного загрузочного устройства / Е.Я. Клоцман, В.Ф. Солодко, Г.С. Зозуля // Черная металлургия: бюл. ин-та «Черметинформация». – 1989. – № 1. – С. 52-53.
203. Кенеман, Ф.Е. О свободном истечении сыпучих тел / Ф.Е. Кенеман // Изв. АН СССР, ОТН. Механика и машиностроение. – 1960. – № 2. – С. 70-77.

204. Лебедев, В.А. Исследование закономерностей движения сыпучих материалов в бункерах / В.А. Лебедев, П.Г. Русаков. – Киев, 1983. – Деп. В УкрНИИНТИ 28.12.1983, №1435 УК-Д83. – 12 с.

205. Малахов, Г.М. Теория и практика выпуска обрушенной руды / Г.М. Малахов, В.Р. Безух, П.Д. Петренко. – М.: Недра, 1968. – 311 с.

206. Лебедев, В.А. Закономерности движения сыпучих материалов в бункерах / В.А. Лебедев, П.Г. Русаков, С.Н. Петрушов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1993. – № 3. – С. 20-24.

207. Прокофьев, И.П. Давление сыпучих тел и расчет подпорных стенок / И.П. Прокофьев. – М.: Госстройиздат, 1940. – 110 с.

208. Зенков, Р.Л. Механика насыпных грузов / Р.Л. Зенков. – М.: Машгиз, 1964. – 251 с.

209. Бункерные устройства / Р.Л. Зенков и др. – М.: Машиностроение, 1977. – 221 с.

210. Емкости для сыпусих грузов в транспортно-грузовых системах: учебное пособие / И.В. Горюшинский, И.И. Кононов, В.В. Денисов, Е.В. Горюшинская, Н.В. Петрушкин. – Самара: СамГапс, 2003. – 232 с.

211. Стефанович, М.А. Анализ хода доменного процесса / М.А. Стефанович. – Свердловск: Metallurgizdat, 1960. – 284 с.

212. Малахов, Г.М. Выпуск руды из обрушенных блоков / Г.М. Малахов. – М.: Metallurgizdat, 1952. – 286 с.

213. Квапил, Р. Движение сыпучих материалов в бункерах / Р. Квапил. – М.: Госгортехиздат, 1961. – 79 с.

214. Коротич, В.И. Теоретические основы технологий окускования металлургического сырья / В.И. Коротич, Ю.А. Фролов, Л.И. Каплун // Агломерация: учебное пособие. – 2-е изд., испр. и доп. — Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2009. — 417 с.

215. Элементы теории сыпучей среды в приложении к загрузке материалов доменную печь / Е.Г. Донсков, В.П. Лялюк, В.И. Ильченко, Е.Е. Донсков, О.Н. Мирошниченко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2008. – № 5. – С. 60-63.

216. Лялюк, В.П. О равномерности распределения параметров доменной плавки по окружности доменной печи / В.П. Лялюк, И.Г. Товаровский, Д.А. Кассим // Сталь. – 2018. – №3. – С. 8-13.

217. Быков, Л.В. Апробирование алгоритма автоматического управления окружным распределением газового потока в производственных условиях доменной плавки / Л.В. Быков // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 3. – С. 6-9.

218. Влияние распределения дутья по фурмам на газовый поток в доменной печи / К.М. Бугаев, В.М. Антонов, Г.В. Варшавский и др. // Сталь. – 1987. – №2. – С. 17–22.

219. Дружков, В.Г. Методы определения расхода горячего дутья на отдельно взятую фурму в горне доменной печи / В.Г. Дружков, М.Ю. Ширшов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2015. – №2. – С. 21-27.

220. Экспериментальное исследование распределения дутья по фурменным приборам доменной печи перед задувкой / Ф.Р. Шкляр, Н.М. Бабушкин, В.Н. Тимофеев и др. // Теплотехника доменного и агломерационного производства: тр. ВНИИМТ. – М.: Metallургия, 1966. – №4. – С. 313-325.

221. Федоренко, Г.И. Исследование влияния диаметра кольцевого воздухопровода на неравномерность распределения дутья по фурмам доменной печи / Г.И. Федоренко, В.Н. Гоцуленко, А. И. Куприн // Известия вузов. Черная Metallургия. – 1990. – №4. – С. 7-10.

222. Бугаев, К.М. Распределение газов в доменных печах / К.М. Бугаев. – М.: Metallургия, 1974. – 176 с.

223. Распределение дутья по окружности в доменной печи объемом  $5000 \text{ м}^3$  / В.И. Большаков, С.Г. Шулико, В.В. Лебедь, Ю.С. Семенов и др. // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2005. – №2. – С. 10-16.

224. Дружков, В.Г. Оценка эффективности применения различных способов подвода горячего дутья в кольцевой воздухопровод доменной печи /

В.Г. Дружков, М.Ю. Ширшов // Теория и технология металлургического производства. – 2016. – №1. – С. 13-17.

225. Дружков, В.Г. Совершенствование узла подвода горячего дутья в кольцевой воздухопровод доменной печи / В.Г. Дружков, М.Ю. Ширшов // Металлург. – 2016. – №12. – С. 39-42.

226. Дружков, В.Г. Причины неравномерного распределения дутья по фурмам доменных печей и необходимость оснащения их САРД нового поколения / В.Г. Дружков, М.Ю. Ширшов // Теория и технология металлургического производства. – 2014. – № 1. – С. 21-23.

227. Результаты оценки равномерности распределения дутья по фурмам доменных печей / М.Ю. Ширшов, В.Г. Дружков, А.В. Павлов, И.Е. Прохоров // Теория и технология металлургического производства. – 2014. – № 2. – С. 27-30.

228. Дружков, В.Г. Совершенствование систем автоматического распределения дутья по фурмам доменных печей / В.Г. Дружков, М.Ю. Ширшов // Сталь. – 2015. – №1. – С. 9-12.

229. Пути улучшения распределения дутья в доменной печи / В.И. Большаков, В.И. Логинов, Ф.М. Шутылев и др. // Сталь. – 2006. – №5. – С. 11-14.

230. Дружков, В.Г. Устройство для ввода горячего дутья в доменную печь: Патент на полезную модель №158168 РФ / В.Г. Дружков, М.Ю. Ширшов; опубл. 20.12.2015 в БИ и ПМ № 35

231. Андронов, В.Н. Оценка эффективности распределения дутья и природного газа по фурмам / В.Н. Андронов, Ю.А. Белов // Сталь. – 2002. – №9. – С. 15-17.

232. Исследование влияния распределения газового потока на ровность схода материалов по окружности доменной печи / В.С. Листопадов, К.А. Дмитриенко, А.А. Параносенков, Н.М. Загоровская // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2008. – №6. – С. 11-15.

233. Автоматическая коррекция параметров комбинированного дутья / Ю.Н. Овчинников, Н.А. Спирин, В.В. Мадисон и др. // Металлург. – 1981. – № 6. – С. 15-16.

234. Андронов, В.Н. / Оптимизация параметров комбинированного дутья / В.Н. Андронов // Сталь. – 1978. – № 7. – С. 587-592.

235. Андронов, В.Н. К вопросу об интенсивности доменной плавки / В.Н. Андронов // Форсирование доменной плавки. – М.: Metallurgizdat, 1963. – 140-152 с.

236. Васюра, Г.Г. Методика расчета расхода газа по кольцевым сечениям доменной печи / Г.Г. Васюра // Черная металлургия. – 2004. – № 1. – С. 8-12.

237. Управление процессами в фурменной и противоточной зонах доменной печи регулированием расхода топливных добавок / С.М. Тлеугабулов, Б.С. Тлеугабулов, Г.М. Койшина, Д.Х. Алтыбаева, Е.Б. Тажиев // Сталь. – 2015. – № 8. – С. 16-20.

238. Кудинов, Д.З. Неравномерность газового потока и температурное поле в доменной печи / Д.З. Кудинов, Н.А. Субботина, В.С. Шаврин // Черная металлургия. – 1999. – № 7. – С. 74.

239. Улучшение хода доменной печи выравниванием распределения водорода по сечению шахты / Н.С. Антипов, А.П. Калинин, А.А. Гришкова, Т.М. Новикова и др. // Сталь. – № 9. – 1985. – С. 11-15.

240. Четыркин Е.И. Работа доменных печей со стабилизацией расхода природного газа / Е.И. Четыркин, Л.Д. Шаркевич // Сталь. – № 7. – 1993. – С. 7-9.

241. Особенности работы распределителей шихты различных типов на печах большого объема / Е.Г. Донсков, Г.П. Костенко, Г.И. Орел и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2006. – № 1. – С. 11-14.

242. Сторожик, Д.А. Изготовление и эксплуатация загрузочных устройств доменных печей / Д.А. Сторожик, В.М. Гребенюк, М.А. Тылкин. – М.: Металлургия, 1973. – 319 с.

243. Оценка окружного распределения шихты на доменной печи с лотковым БЗУ / В.В. Большаков, Н.А. Рослик, Ф.М. Шутылев А.П. Котов // Сталь. – 1993. – № 2. – С. 11 – 14.

244. Макаров, Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов: монография / Ю.И. Макаров. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.

245. Влияние расположения добавок в слое агломерата в бункере компактного БЗУ на равномерность поступления шихтовых материалов в колошниковое пространство печи / А.С. Харченко, С.К. Сибгатуллин, Е.О. Теплых и др. // Теория и практика тепловых процессов в металлургии: сб. докл. Международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2012. – С. 150-154.

246. Зависимость коэффициента равномерности выхода шихтовых материалов в колошниковое пространство от последовательности их расположения в бункере БЗУ / А.С. Харченко, С.К. Сибгатуллин, Е.О. Теплых, и др. // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сб. докл. 9-й научно-практической конференции. – Липецк: ФГБОУ ВПО «ЛГТУ», 2012. – С. 39-44.

247. Влияние последовательности расположения агломерата по крупности в бункере БЗУ на однородность его поступления в колошниковое пространство печи / С.К. Сибгатуллин, Е.О. Теплых, А.С. Харченко и др. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: сб. докл. 70-й межрегион. научно-технической конференции. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2012. – Т.1. – С. 125-127.

248. Большаков, В.И. Совершенствование управления окружным распределением шихты на доменной печи, оснащенной БЗУ / В.И. Большаков, В.В. Лебедь, А.А. Жеребецкий // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. научн. тр. – Днепропетровск: ИЧМ НАН Украины, 2010. – Вып. 22. – С. 18-26.

249. Критерии и способы оценки качества смешивания сыпучих материалов / В.В. Воронин, К.А. Адигамов, С.С. Петренко, Р.А. Сизякин // Инженерный вестник дона. – 2012. – Т. 23. – № 4-2 (23). – С. 36.

250. Seber, G.A. Multivariate Observations, Wiley, New York, – 1984. – 686 p.

251. Spath, H. Cluster Dissection and Analysis: Theory, FORTRAN Programs, Examples, translated by J. Goldschmidt, Halsted Press, New York, – 1985.

252. Gorban, A.N. Principal Graphs and Manifolds, Ch. 2 in: Handbook of Research on Machine Learning Applications and Trends: Algorithms, Methods, and

Techniques / A.N. Gorban, A.Y. Zinovyev, S.O. Emilio et al. // IGI Global, Hershey, PA, USA, 2009, pp. 28-59.

253. А.с. № 1651172 RU. Способ определения равномерности распределения легирующих элементов в сплавах / С.В. Твердохлебова, И.М. Спиридонова; заявл. 23.05.1989; опубл. 23.05.1991, Бюл. № 19.

254. Байбуз, А.Г. Система диагностики нагрева и распределения газа на колошнике доменной печи / А.Г. Байбуз, Г.В. Матвеев, Н.Н. Изюмский // Сталь. – 2001. – № 8. – С.56-58.

255. Оценка изменения профиля засыпи шихты в доменной печи радиолокационным уровнемером / В.И. Большаков, С.Т. Шулико, И.Г. Муравьева и др. // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – 2004. – № 2. – С.117-121.

256. Высоцки, Г. Состояние огнеупорной футеровки двух доменных печей после их остановки / Г. Высоцки, Д. Вицер // Черные металлы. – 1976. – №13. – С. 22-28.

257. Анализ поведения щелочей в доменной печи / И.Ф. Курунов, В.Н. Титов, В.Л. Емельянов и др. // Metallurg. – 2009. – №9. – С. 34-39.

258. Механизм накопления щелочей в доменной печи и пути ограничения их вредного влияния / Е.И. Хрущев, И.М. Пештиев, А.А. Малимон и др. // Tr. V Международного конгресса доменщиков (Днепропетровск – Кривой Рог, 7-12 июня 1999 г.). – Днепропетровск: Пороги, 1999. – С. 218-219.

259. Гладков, Н.А. Влияние щелочей на процесс доменной плавки / Н.А. Гладков, С.А. Николаев, Л.Г. Будник // Metallurg. – 1986. – №2. – С.12-15.

260. Распределение щелочных соединений в доменной печи большого объема / Н.Н. Чернов, Т.В. Демиденко, Б.Ф. Мардер и др. // Metallurg. – 1983. – №5. – С. 12-14.

261. Редько, А.Н. Влияние цинка на срок службы доменной печи / А.Н. Редько // Сталь. – 1947. – № 1. – С. 19-26.

262. Галемин, И.М. Настыли на колошнике и в газоотводах доменных печей при плавке цинкосодержащих железных руд / И.М. Галемин, А.В. Горох // Сталь. – 1961. – № 12. – С. 1062-1064.

263. Жило, Н.Л. О причинах износа кладки и холодильников в доменных печах ММК / Н.Л. Жило, Р.Ф. Першина, Л.А. Белова // Сталь. – 1977. – № 4. – С. 300-304.

264. Поведение цинка в доменной печи: монография / Ю.П. Щукин, В.Л. Терентьев, К.Н. Вдовин, В.И. Сединкин и др. // Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 1999. – 84 с.

265. Механизм циркуляции цинка в доменной печи / Ю.П. Щукин, В.И. Гладышев, Н.С. Антипов и др. // Сталь. – 1986. – № 9. – С. 8-14.

266. Поведение цинка в пирометаллургических процессах черной металлургии / О.Н. Козлова, Г.С. Подгородецкий, Д.Б. Макеев, В.Б. Горбунов // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы тринадцатой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – 2016. – С. 216-222.

267. Попов, А.П. Причины образования настыли в доменных печах ЧМЗ / А.П. Попов, Л.З. Ходак, Ю.А. Попов // Сталь. – 1953. – № 4. – С. 313-321.

268. Виллейс, Я. Исследование настылей в доменной печи и удаление их путем взрыва / Я. Виллейс, Г. Хайнерт // Черные металлы. – 1964. – №2. С. 57-62.

269. Леонтьев, Л.И. Использование сырьевого потенциала техногенных металлургических ресурсов в условиях модернизации цинковой отрасли / Л.И. Леонтьев, О.С. Брянцева, В.Г. Дюбанов // Экономика региона. – 2012. – № 4 (32). – С. 166-173.

270. Валавин, В.С. Поведение цинка в агломерационном процессе / В.С. Валавин, Ю.С. Юсфин, Г.С. Подгородецкий // Сталь. – 1988. – № 4. – С. 12.

271. Результаты опытно-промышленных испытаний новых способов удаления цинка из доменной печи / Ю.П. Щукин, В.И. Сединкин, В.С. Новиков и др. // Сталь. – 1997. – № 3. – С. 11-13.

272. Сохранность рабочего профиля доменных печей в процессе эксплуатации / Г.И. Крячко, Г.И. Орел, П.А. Васюченко и др. // *Металлург.* – 2005. – № 11. – С. 37-41.

273. Опыт применения неофлюсованных окатышей ССГОК в шихте доменных печей ММК / В.С. Новиков, Н.Н. Бабарыкин, Н.М. Крюков и др. // *Производство чугуна.* – Свердловск: УПИ, 1976. – С. 84 – 93.

274. Бабарыкин, Н.Н. Использование неофлюсованных окатышей для выплавки чугуна / Н.Н. Бабарыкин, Г.В. Горбунов, Б.А. Марсуверский // *Информация института «Черметинформация». Сер. «Производство чугуна».* Вып. 2. – М.: Черметинформация, 1980. – 19 с.

275. Исследование причин износа кладки и системы охлаждения доменной печи № 4 объемом 2000 м<sup>3</sup> ОХМК / М.В. Рогов, С.К. Сибатуллин, Г.М. Гуляев и др. // *Бюллетень НТИ. Черная металлургия.* – 1990. – № 2. – С. 53-54.

276. Пат. 2625620 РФ, С 21 В 3/00 (2006.01). Способ доменной плавки / А.В. Павлов, А.А. Полинов, В.А. Гостенин и др.

277. Марсуверский, Б.А. Совершенствование технологии производства и плавки титаномагнетитов качканарского ГОКа в доменных печах / Б.А. Марсуверский. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2013. – 395 с.

278. Марсуверский, Б.А. Оптимизация профиля доменной печи для различных условий доменной плавки // Б.А. Марсуверский, П.И. Прошин, А.И. Бочаров // *Сталь.* – 1995. – № 1. – С. 11-13.

279. Терентьев, А.В. Формирование титанистого гарнисажа в доменной печи / А.В. Терентьев, С.К. Сибатуллин, А.Л. Мавров // *Известия вузов. Чёрная металлургия.* – 2004. – № 7. – С. 15.

280. Нефёдов, С.Н. Формирование карбидного гарнисажа на футеровке горна доменной печи / С.Н. Нефёдов, В.Л. Терентьев, С.К. Сибатуллин и др. // *Чёрные металлы.* – 2002. – № 1. – С. 5 – 7.

281. Горбунов, Г.В. Строение и состав гарнисажа доменных печей ММК / Г.В. Горбунов, Н.Н. Бабарыкин // *Производство чугуна.* – Свердловск: УПИ, 1980. – С. 111-124.

282. Сибатуллин, С.К. Применение органических связующих компонентов в процессе агломерации железорудного сырья / С.К. Сибатуллин, А.В. Иванов, И.В. Решетова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2010. – № 4. – С. 30-32.

283. Производство агломерата при снижении в шихте доли концентрата ССГПО и аглоруды Михайловского ГОКа в условиях ОАО «ММК» / С.К. Сибатуллин, К.В. Сенькин, М.Ф. Гибадулин, В.А. Гостенин, В.Д. Некеров // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2005. – № 4 (12). – С. 9-10.

284. Сибатуллин, С.К. Оптимальная степень прямого восстановления железа из оксидов / С.К. Сибатуллин // Сталь. – 1997. – № 4. – С. 1-5

285. Сибатуллин, С.К. К расчету показателей хода доменного процесса при повышенном общем перепаде давления газов / С.К. Сибатуллин, Т.В. Майорова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2010. – № 3. – С. 16-18.

286. Сибатуллин, С.К. Увеличение работы газового потока в доменной печи с повышением общего перепада давления по высоте / С.К. Сибатуллин, Т.В. Майорова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2011. – № 1. – С. 14-16.

287. Сибатуллин, С.К. О влиянии изменения параметров состояния газа на величину его работы в доменной печи / С.К. Сибатуллин, Т.В. Майорова, А.А. Полинов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2007. – № 4. – С. 34-37.

288. Моделирование поведения шихтовых материалов в доменной печи / А.Ю. Чернавин, Г.А. Нечкин, Д.А. Чернавин, В.А. Кобелев / Доменное производство – XXI век: труды международного конгресса доменщиков, Москва, 12-16 апр. – 2010. – С. 442-448.

289. Федченко, В.М. Идентификация и количественная оценка плавающего загромождения в горне доменной печи / В.М. Федченко // Новости черной металлургии за рубежом. – 2006. – № 5. – С. 17-22.

290. Некоторые технологические особенности работы доменной печи с низким выходом шлака / А.А. Калько, Е.Н. Виноградов, Е.А. Волков, А.С. Нестеров и др. // Черная металлургия. – 2016. – № 3. – С. 154-155.

291. Вильданов, С.К. К вопросу о методике измерения электропроводности жидких шлаков / С.К. Вильданов, В.С. Валавин, П.П. Арсентьев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1991. – № 11. – С. 30.

292. Акимов, Е.Н. Электропроводность высокоглиноземистых и высокохромистых шлаков / Е.Н. Акимов, Н.В. Мальков, В.Е. Роцин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 186-188.

293. Новохатский, А.М. Система контроля состояния горна доменной печи / А.М. Новохатский, Г.Д. Михайлюк // Черная металлургия. – 2012. – Авг. – С. 13-16.

294. Sun Yongqi. Влияние добавки  $P_2O_5$  на вязкость и структуру Ti-содержащих доменных шлаков / Sun Yongqi, Zheng Kai, Liao Junlin, Wang Xidong et al. // ISIJ Int. – 2014. – №7. – С. 1491-1497.

295. Jeong In-Hyeon. Влияние поверхностного натяжения на движение потоков жидких чугуна и шлака в слое кокса / Jeong In-Hyeon, Jung Sung-Mo, Kim Hyun-Soo, Sasaki Yasushi // The Iron and Steel Technology Conference and Exposition, Indianapolis, 5-8 May. – 2014. – С. 493-498.

296. Аналитическая оценка свойства доменных шлаков, обеспечивающих устойчивую работу печи в нестационарных условиях / Д.Н. Тогобицкая, Н.М. Можаренко, А.И. Белькова, Д.А. Степаненко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – № 4. – С. 13-17.

297. Wang Fujia. Исследование влияния  $TiO_2/SiO_2$  на состояние доменной печи, включающей V-Ti –магнетит / Wang Fujia, Lu Qing, Chen Shujun // Iron Steel Vanadium Titanium. – 2015. – №36. – С. 79-83.

298. Tian Ye. Определение текучести доменного шлака с высоким содержанием щелочей и  $TiO_2$  / Tian Ye, Chen Shujun, Lu Qing, Sun Yanqin et al. // Iron Steel Vanadium Titanium. – 2016. – №5. – С. 91-95.

299. Zhang Li. Механизм выделения и роста перовскитной фазы в расплаве Ti-содержащего доменного шлака при динамических условиях окисления / Zhang Li, Zhang Wu, Li Guang-qiang // Chin. J. Eng. – 2016. – С. 1553-1558.

300. Исследование влияния содержания MgO в доменном шлаке на удаление серы из чугуна / Ю.В. Мосейко, Ю.В. Курис, О.С. Воденникова, С.В. Баранник, П.И. Беспалов и др. // *Металлургия*. – 2015. – №1. – С. 5-8.

301. Jia-Shyan Shiau. Совершенствование метода предсказания жидкотекучести шлака для управления доменным процессом / Jia-Shyan Shiau // 7 European Coke and Ironmaking Congress, Linz, 12-14 Sept. Leoben 2016. – С. 113.

302. Duan Sheng-chao. Кинетика реакции удаления марганца из насыщенного углеродом чугуна шлаком на основе  $\text{CaF}_2\text{-CaO-SiO}_2$  / Duan Sheng-chao, Li Chuang, Guo Han-jie, Guo Jing et al. // *Int. J. Miner. Met. and Mater.* 2018. – №4. – С. 399-404.

303. Nishioka Koki. Исследование влияния содержания FeO в стекающем шлаке на дренажную способность горна доменной печи / Nishioka Koki, Maeda Takayuki, Shimizu Masakata // *Iron and Steel Inst. Jap.* – 2006. – №12. – С. 986-995.

304. Mineralogy of blast furnace slags / E.A. Gorbatova, A.S. Kharchenko, E.G. Ozhogina, O.A. Yakushina // *Вестник института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН*. – 2017. – № 4. – С. 24-28.

305. Нечкин, Г.А. Формирование доменной шихты с целью улучшения фильтруемости расплава через коксовую насадку горна / Г.А. Нечкин, В.А. Кобелев, А.Ю. Чернавин // *Черная металлургия*. – 2014. – № 9. – С. 23-26.

306. Скачко, А.С. Влияние состава шихты на коэффициент распределения элементов между продуктами доменной плавки / А.С. Скачко, Д.Н. Тогобицкая, А.И. Белькова // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2013. – № 4. – С. 8-14.

307. Тлеугабулов С.М. Безынерционное управление доменным процессом и науглероживание металла // С.М. Тлеугабулов, Б.С. Тлеугабулов // *Сталь*. – 2016. – № 5. – С. 6-10.

308. Расчет задувочной шихты для доменной печи с регулируемыми процессами шлакообразования и восстановления / Н.А. Спири́н, М.Ф. Гибадулин, И.Е. Косаченко, О.П. Онорин, А.В. Павлов, В.Ю. Рыболовлев // Сталь. – 2006. – № 3. – С. 7-11.

309. Коршиков, Г.В. Рациональные параметры комбинированного дутья при загромождении горнов доменных печей / Г.В. Коршиков, В.Н. Титов, А.Л. Полосин // Сталь. – 2009. – № 3. – С. 6.

310. Оценка формы зоны вязкопластичных масс железорудных материалов в доменной печи методом математического моделирования / О.П. Онорин, Н.А. Спири́н, В.В. Лавров, И.Е. Косаченко, В.Ю. Рыболовлев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2013. – № 6. – С. 24-29.

311. Определение интервала размягчения железорудных материалов различных фракций при доменной плавки / Ю.В. Мосейко, Ю.В. Курис, О.С. Воденникова, С.В. Баранник и др. // Металлургия. – 2015. – №2. – С. 9-14.

312. Большаков, В.И. Определение границ пластичной зоны в доменной печи / В.И. Большаков, Н.А. Гладкова, И.Г. Муравьева, Е.А. Белошапка // Черная металлургия. – 2006. – № 12. – С. 29-33.

313. Влияние шлакового режима на поведение щелочных соединений в доменной печи / А.А. Полинов, А.В. Павлов, С.Н. Пишнограев, Г.Н. Логачёв, Н.А. Спири́н // Металлург. – 2017. – № 3. – С. 31-34.

314. Костромин, А.В. Программа реализация информационно-моделирующей системы шлакового режима доменных печей ОАО «ММК» / А.В. Костромин, В.В. Лавров, Н.А. Спири́н // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов 1 Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, Екатеринбург, 29-30 марта. – 2012. – С. 223-227.

315. Юрьев, Б.П. Изучение теплофизических свойств шлакообразующих смесей / Б.П. Юрьев, Н.А. Спири́н // Известия вузов. Черная металлургия. – 2011. – № 6. – С. 36-39.

316. Глеугабулов, С.М. Детерминированное управление окислительно-восстановительными процессами доменной плавки / С.М. Глеугабулов, Б.С. Глеугабулов, С.Б. Абииков // Сталь. – 2017. – № 2. – С. 10-14.

317. Моделирование шлакового режима доменной плавки / Н.А. Спирин, О.П. Онорин, В.Ю. Рыболовлев, А.И. Перминов, К.Л. Щипанов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2005. – № 8. – С. 51-55.

318. Дренажная способность разных видов коксов по отношению к продуктам железорудных материалов / А.Ю. Чернавин, М.И. Стуков, М.В. Зорин, Д.В. Ворсина и др. // Новые технологии и материалы в металлургии: сборник научных трудов Уральского института металлургии. – 2015. – С. 193-198.

319. Разработка специальных промывочных материалов и технологии промывки доменных печей / А.Ю. Чернавин, Г.А. Нечкин, Д.А. Чернавин, В.А. Кобелев // Новые технологии и материалы в металлургии: сборник научных трудов Уральского института металлургии. – 2015. – С. 186-191.

320. Аржадеева, Г.Ю. Влияние реакционной способности кокса на технико-экономические показатели доменного процесса / Г.Ю. Аржадеева, А.Н. Дмитриев, Ю.А. Чесноков // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2011. – Т. 1. – № 69. – С. 100-103.

321. Dmitriev, A. N. Methodical basis of investigation of influence of the iron ore materials and coke metallurgical characteristics on the blast furnace smelting efficiency / A. N. Dmitriev, G. Yu. Vitkina, Yu. A. Chesnokov // Advanced Materials Research. – 2013. – V. 602-604. – P. 365-375.

322. Товаровский, И. Г. Нормативная оценка влияния параметров ДП на расход кокса и производительность / И. Г. Товаровский // Сталь. – 2014. – № 5. – С. 4–11.

323. Об условиях, необходимых для эффективного использования коксового орешка в шихте доменной печи / А.С. Харченко, Е.О. Теплых, А.А. Полинов, и др. // Теория и технология металлургического производства. – 2010. – №1. – С. 26-30.

324. Пат. 2112044 РФ, С 21 В 3/00 (1995.01), 96122705/02. Способ промывки горна доменной печи / О.Ю. Харитонов, Г.С. Шибяев, В.М. Коуров, Н.В. Стефанов.

325. Пат. 2360974 РФ, С 21 В 5/00 (2006.01). Способ промывки доменной печи / Ю.А. Бодяев, В.А. Гостенин, С.К. Сибягатуллин, М.Ф. Гибадуллин, В.Л. Терентьев, А.Л. Мавров, В.М. Колокольцев, В.А. Осипов, А.Г. Валуев, Ф.Ф. Очеретнюк.

326. Пат. 2547390 РФ, С 21 В 3/00 (2006.01). Способ промывки доменной печи / Е.Н. Виноградов, М.А. Гуркин, М.М. Каримов, В.В. Смирнов, А.А. Калько, Е.А. Волков, А.С. Нестеров, Н.Г. Иванча.

327. Пат. 2248400 РФ, С21В 3/00 (2000.01). Способ промывки доменной печи / И.М. Шатохин, С.К. Сибягатуллин.

328. Пат. 2206622 РФ, С21В 3/00 (2000.01). Способ промывки доменной печи / В.С. Лисин, В.Н. Скороходов, В.П. Настич, В.Г. Мизин, В.М. Кукарцев, Д.В. Захаров, А.Ю. Зарапин, В.Н. Григорьев, И.С. Яриков, В.Л. Емельянов.

329. Пат. 2067998 РФ, С21В 3/00 (1995.01). Способ промывки доменной печи / Г.Н. Мулько, Г.М. Гуляев, А.А. Бондарь, М.В. Рогов, В.Г. Подпорин, В.А. Зайцев, В.А. Кобелев, В.В. Павлов, А.И. Истеев.

330. Пат. 2136761 РФ, С21В 3/00 (1995.01). Способ промывки горна доменной печи / И.В. Франценюк, Г.В. Коршиков, Н.С. Иноземцев, С.Л. Зевин, В.Н. Григорьев, И.С. Яриков, Е.Г. Коршикова.

331. Пат. 97112680 РФ, С21В 3/00 (1995.01). Способ промывки горна доменной печи / Б.Ф. Чернобривец, И.С. Яриков, С.Л. Зевин, Г.В. Коршиков, В.В. Греков, В.В. Науменко, В.Н. Григорьев, А.С. Кузнецов.

332. Пат. 2071973 РФ, С21В 3/00 (1995.01). Способ промывки горна доменной печи / Ф.А. Москалина, А.К. Икконен, В.Н. Логинов, А.П. Котов, Н.Д. Егоров, В.И. Нетронин, С.Н. Зубарь.

333. Пат. 2303070 РФ, С21В 3/00 (2006.01). Способ промывки горна доменной печи / В.В. Греков, А.Н. Зубцов, С.С. Ляпин, Г.В. Коршшиков, Н.С. Иноземцев, А.К. Семенов.

334. Пат. 2183219 РФ, С21В 3/00 (2000.01). Способ промывки горна доменной печи / И.С. Яриков, И.Ф. Курунов, В.Н. Григорьев, В.И. Плешков, В.Г. Ананьевский, В.Л. Емельянов, С.С. Ляпин.

335. Пат. 2343199 РФ, С21В 3/00 (2006.01). Способ промывки горна доменной печи / В.Н. Логинов, М.Ю. Суханов, Л.Е. Васильев, М.М. Киримов, Н.М. Можаренко, А.С. Нестеров, В.С. Якушев, Н.Г. Иванча.

336. Пат. 1627561 СССР, С21В 5/00 (1990.01). Способ промывки горна доменной печи / В.Н. Дорофеев, А.М. Новохатский, Г.Д. Михайлюк, Г.Г. Васюра, В.А. Гордиенко, С.И. Первушин, Е.В. Слободянюк, К.А. Николдаев.

337. Пат. 2238329 РФ, С21В 3/00 (2000.01). Способ промывки доменной печи / И.Ф. Курунов, И.С. Яриков, С.С. Ляпин, Д.Д. Иванов, В.Л. Емельянов, В.Н. Титов, Д.Н. Тихонов.

338. Пат. 2119958 РФ, С21В 3/00 (1995.01). Способ промывки горна доменной печи / Б.Ф. Чернобривец, И.С. Яриков, С.Л. Зевин, Г.В. Коршиков, В.В. Греков, В.В. Науменко, В.Н. Григорьев, А.С. Кузнецов.

339. Пат. 2150510 РФ, С21В 5/00 (2000.01). Способ доменной плавки / В.Ф. Рашников, А.А. Морозов, Р.С. Тахаутдинов, В.Л. Терентьев, К.Н. Вдовин, С.К. Сибатуллин, С.Г. Краснов, Е.В. Карпов, В.Н. Котий

340. Пат. 2177039 РФ, С21В 5/00 (2000.01). Способ доменной плавки / В.Ф. Рашников, А.А. Морозов, Р.С. Тахаутдинов, Е.В. Карпов, В.Л. Терентьев, К.Н. Вдовин, С.К. Сибатуллин, В.М. Колокольцев, Г.П. Лежнев.

341. Пат. 2172780 РФ, С21В 5/00 (2000.01). Способ доменной плавки / В.Ф. Рашников, А.А. Морозов, Р.С. Тахаутдинов, Е.В. Карпов, В.Л. Терентьев, К.Н. Вдовин, С.К. Сибатуллин, В.М. Колокольцев, Г.П. Лежнев, В.Т. Кулаковский.

342. Пат. 2178000 РФ, С21В 5/00 (2000.01). Способ доменной плавки / В.Ф. Рашников, А.А. Морозов, Р.С. Тахаутдинов, Е.В. Карпов, В.Л. Терентьев, К.Н. Вдовин, С.К. Сибатуллин, В.М. Колокольцев, Г.П. Лежнев

343. Пат. 2063443 РФ, С21В 5/00 (1995.01). Способ доменной плавки / С.Г. Меламуд, Б.А. Марсуверский, А.Ю. Чернавин, В.С. Рудин, Б.П. Рыбаков, С.Р. Зориг.

344. Пат. 2295573 РФ, С21В 5/00 (2006.01). Способ доменной плавки / Л.Д. Никитин, Л.В. Портнов, С.Ф. Бугаев, Н.Т. Чуднова, Н.Г. Дячок, В.П. Горбачев.

345. Промывочные материалы для доменной плавки / В.А. Кобелев, А.Ю. Чернавин, Г.А. Нечкин, Д.А. Чернавин, И.А. Сергиенко // Доменное производство – XXI век: труды Международного конгресса доменщиков, Москва, 12-16 апреля. – 2010. – С. 137-140.

346. Крячко, Г.Ю. К вопросу о поведении марганца в доменной печи / Г.Ю. Крячко, Р.В. Авдеев // Теория и практика производства чугуна: труды Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию КГГМК «Криворожсталь», Кривой Рог, 24-27 мая. – 2004. – С. 341-343.

347. Дашевский, В.Я. Марганец Российской Федерации / В.Я. Дашевский, В.И. Жучков, Л.И. Леонтьев // Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР: ФЕРРОСПЛАВЫ: труды научно-практической конференции с международным участием и элементами школы молодых ученых. – 2018. – С. 56-66.

348. Особенности доменной плавки при работе на железорудном сырье сложного состава месторождений центрального Казахстана / А.А. Ванак, Ю.К. Абраменко, А.М. Печеркин, Н.Е. Султанов // Сталь. – 2007. – № 8. – С. 5-7.

349. Восстановительная плавка комплексного железорудного сырья / С.М. Тлеугабулов, С.Б. Абииков, Д.Х. Алтыбаева, Ю.Д. Исупов, Б.С. Тлеугабулов // Сталь. – 2015. – № 5. – С. 20-24.

350. Улучшение дренажной способности шлака доменной плавки / В.А. Долинский, Л.Д. Никитин, Л.В. Портнов, С.Ф. Бугаев, К.И. Домнин // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. – 2008. – № 22. – С. 41-50.

351. Промывка горна доменной печи шлаком от выплавки ферромарганца / В.Л. Терентьев, С.К. Сибатуллин, С.Н. Нефёдов, С.Н. Пишнограев, И.Е. Прохоров, А.М. Фадеев // Теория и технология металлургического производства. – 2003. – №3. – С. 29-33.

352. Влияние расхода конвертерного шлака на показатели работы доменных печей / А.А. Полинов, А.В. Павлов, Г.Н. Логачёв, О.П. Онорин, Н.А. Спирин // *Металлург.* – 2017. – № 4. – С. 41-47.

353. Еремеев, Н.А. Опыт промышленного использования конвертерного шлака Южно-Уральского никелевого комбината в качестве раскислителя в ДЦ ПАО ЧМК / Н.А. Еремеев, А.Ж. Лысюк // *Сталь.* – 2018. – № 3. – С. 7.

354. Зоря, В.Н. Оценка металлургической ценности конвертерного шлака / В.Н. Зоря, Е.П. Волынкина, Е.В. Протопопов // *Известия вузов. Черная металлургия.* – 2013. – № 10. – С.29-34

355. Непрерывная добавка конвертерного шлака в шихту доменной печи / А.А. Полинов, А.В. Павлов, Н.А. Спирин, Г. Логачев и др. // *AISTech Conference Proceedings, Philadelphia, Tenn., 7-10 May, 2017* – С. 317-322.

356. Тучина, Н.Н. Использование конвертерных шлаков никелевого производства для промывки горнов доменных печей / Н.Н.Тучина // *Наука и производство Урала.* – 2012. – №8. – С 26-33.

357. Гибадуллин, М.Ф. Воздействие промывочного агломерата на ход доменных процессов / М.Ф. Гибадуллин, А.Л. Мавров, В.П. Гридасов, А.В. Терентьев, С.К. Сибагатуллин // *Сталь.* – 2004. – № 12. – С.16-17.

358. Пат. 2254384 РФ, С22В 1/16 (2000.01). Способ производства промывочного агломерата / В.Л. Терентьев, В.ЮБ. Савинов, В.Г. Кузнецов, К.Н. Вдовин, Т.Ф. Ким, А.В. Терентьев.

359. Пат. 2158316 РФ, С22В 1/16 (2000.01). Способ производства промывочного агломерата / В.В. Греков, С.Л. Зевин, Н.С. Иноземцев, Г.В. Коршиков, Е.Г. Коршикова, А.С. Кузнецов, В.В. Науменко, А.К. Семенов, М.А. Хайков.

360. Промывка доменной печи высокозакисным агломератом в ОАО «ММК» / А.В. Терентьев, В.А. Бигеев, В.А. Гостенин, А.Л. Мавров // *Теория и технология металлургического производства.* – 2004. – №4. – С. 43-44.

361. Высокозакисный металлургический брикет для промывки горна доменной печи / Ф.Ф. Очеретнюк, С.В. Юдина, Н.П. Сысоев, М.А. Шерстобитов,

А.Г. Валуев // Теория и технология металлургического производства. – 2005. – №5. – С. 64-67.

362. Опыт промывки горна доменных печей брикетами из окалины / И.Ф. Курунов, Э.М. Щеглов, В.Л. Емельянов, В.Н. Титов, О.Г. Болшакова // Металлург. – 2007. – №6. – С. 36-39.

363. Курунов, И.Ф. Брикетты для промывки горна доменных печей / И.Ф. Курунов, О.Г. Болшакова // Металлург. – 2007. – № 5. – С. 46-50.

364. Промывка доменных печей специальными промывочными брикетами / А.Ю. Чернавин, Г.А. Нечкин, Д.А. Чернавин, В.А. Кобелев, Е.А. Терентьев, В.В. Бабанакон // Черная металлургия. – 2010. – №11. – С. 19-21.

365. Регулирование работы горна доменной печи / А.М. Коверзин, Л.В. Портнов, Л.Д. Никитин, В.Г. Шипицын // Сталь. – 2014. – № 7. – С. 14-16.

366. Пат. 2244013 РФ, С21В 3/00 (2000.01). Шихта для производства брикетов для промывки горна доменной печи / В.С. Лисин, В.Н. Скороходов, И.Ф. Курунов, И.С. Яриков, С.С. Ляпин, Д.Д. Иванов, В.Л. Емельянов, В.Н. Титов, Д.Н. Тихонов.

367. Пат. 2241759 РФ, С21В 3/00 (2000.01). Брикетты для промывки горна доменной печи / В.Н. Скороходов, В.С. Лисин, И.Ф. Курунов, И.Е. Сперкач, И.С. Яриков, С.С. Ляпин, Е.А. Самсиков, А.В. Подлесных, В.М. Чижикова.

368. Пат. 2294389 РФ, С21В 5/00 (2006.01). Брикет для промывки горна доменной печи / В.В. Павлов, О.Б. Моисеев, Л.А. Годик, Н.АА. Козырев, С.Т. Солодков, С.Г. Томских, Н.С. Поялков.

369. Пат. 2183679 РФ, С21В 3/00 (2000.01). Брикет для промывки горна доменной печи и способ изготовления брикетов / В.И. Котенев, В.Г. Оленников, Е.Ю. Барсукова, И.И. Ястребов.

370. Пат. 2609888 РФ, С22В 1/243 (2006.01). Экструзионный промывочный брикет для доменного производства / А.Н. Шаруда, С.В. Павлов.

371. Технология промывки горна изменением расхода природного газа / А.М. Кузнецов, В.П. Падалка, И.Г. Товаровский, С.Л. Ярошевский // Теория и практика производства чугуна: труды Международной научно-технической

конференции, посвященной 70-летию КГГМК «Криворожсталь», Кривой Рог, 24-27 мая. – 2004. – С. 257-259.

372. Опыт применения технологии промывки горна / В.П. Русских, Д.И. Гаврилоглу, В.П. Лялюк, А.П. Витязь, М.Я. Васкевич, А.Н. Батищев // Черная металлургия. – 2011. – № 10. – С. 41-45.

373. Моделирование влияния MnO на характеристики шлака, а так же распределение Mn, Si и S в доменной печи / C. Chun-lin, Z. Ling, W. Steven и др. // Chin. Soc. Metals. – 2009. – С. 1120-1124.

374. Жило, Н.Л. Влияние замены извести магнезией на физические свойства доменных шлаков / Н.Л. Жило, Л.И. Большакова // Известия вузов. Черная металлургия. – 1964. – №8. – С. 25-27.

375. Атлас шлаков / пер. с нем. Г.И. Жмойдина; под ред. И.С. Куликова. – М.: Металлургия, 1985. – 208 с.

376. Вопросы утилизации рафинировочных шлаков сталеплавильного производства: монография / О.Ю. Шешуков, М.А. Михенков, И.В. Некрасов, и др. – Нижний Тагил : НТИ (филиал УрФУ), 2017. – 208 с.

377. Фильтруемость доменных шлаков через коксовую насадку горна доменных печей / Г.А. Нечкин, В.А. Кобелев, А.Ю. Чернавин, Д.А. Чернавин // Черная металлургия. – 2012. – №9. – С. 15-19.

378. Вусихис, А.С. Применение сидеритовых руд бакальского месторождения в производстве чугуна и стали / А.С. Вусихис, Л.И. Леонтьев, Д.З. Кудинов // Металлург. – 2017. – № 2. – С. 27-31.

379. Глеугабулов, Б.С. Совершенствование шлакового режима доменной плавки за счет использования добавок: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2010. – 24 с.

380. Эффективность использования бакальских сидеритов в доменном процессе / А.С. Вусихис, Л.И. Леонтьев, В.С. Гуляков, Д.З. Кудинов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2015. – № 1. – С. 29-34.

381. Получение ожелезненного магнезиального флюса и первородного железа путём металлизации кусковой сидеритовой руды /В.Е. Роцин,

С.П. Салихов, А.В. Рощин, С.А. Брындин // Новые огнеупоры. – 2016. – № S3. – С. 24-25

382. Анализ современных методов переработки сидеритовых руд / А.С. Вусихис, Л.И. Леонтьев, Д.З. Кудинов, О.Ю. Шешуков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2011. – № 3 (35). – С. 49-52.

383. Нечкин, Г.А. Исследование влияния минерального структурообразования на металлургические свойства железорудных агломератов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2015. – 22 с.

384. Тлеугабулов, Б.С. Применение стронцийсодержащего доломита в аглодоменном производстве / Б.С. Тлеугабулов, В.А. Кобелев, А.Ю. Чернавин // Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Интенсификация металлургических процессов и повышение качества металлов и сплавов» (19-21 марта 1990 г.). – Тула, 1990.

385. Тлеугабулов, Б.С. Влияние магнийсодержащих добавок на технико-экономические показатели аглодоменного производства / Б.С. Тлеугабулов // Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Интенсификация металлургических процессов и повышение качества металлов и сплавов» (19-21 марта 1990 г.). – Тула, 1990.

386. Влияние оксидов магния, марганца и основности железорудного материала на фильтруемость продуктов плавки через коксовую насадку горна доменной печи / Г.А. Нечкин, В.А. Кобелев, А.Ю. Чернавин, Д.А. Чернавин // Металлург – 2015. – № 11. – С. 43-46.

387. Сибэгатуллин, С.К. Дифференциальная сканирования калориметрическая характеристика доменного шлака / С.К. Сибэгатуллин, Г.Н. Логачев // Теория и технология металлургического производства. – 2009. – №9. – С. 9-14.

388. Исследование подвижности доменных шлаков / Г.Н. Логачев, В.А. Гостенин, С.Н. Пишнограев, Д.И. Селезнев, В.П. Гридасов // Сталь. – 2013. – №12. – С. 4-6.

389. Cui Shiqiang. Влияние добавок  $\text{CaF}_2$  и  $\text{MgO}$  на свойства шихты доменной печи, содержание V и Ti / Cui Shiqiang, Lu Qing // Iron Steel Vanadium Titanium. – 2014. – №1. – С. 74-78.

390. Жило, Н.Л. Шлаковый режим доменных печей / Н.Л. Жило, Л.И. Большакова, М.Я. Остроухов. – М: Metallurgia, 1967. – С. 149-168.

391. Обоснование величины железорудной порции материала для «мягкой» промывки доменной печи / А.С. Нестеров, В.И. Большаков, Н.М. Можаренко, Д.Н. Тогобицкая, Г.П. Костенко, П.И. Оторвин, А.И. Голобокий, С.В. Нынь // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2006. – № 5. – С. 12-17.

392. Лялюк, В.П. Современные проблемы технологии доменной плавки / В.П. Лялюк. – Днепропетровск: Пороги, 1999. – 164 с.

393. Вейнский, В.В. Исследование влияния различных факторов на реакционную способность кокса / В.В. Вейнский // Теория и технология металлургического производства. – 2005. – №5. – С. 81-85.

394. Синтетический коксующийся уголь – важный резерв повышения эффективности коксодоменного производства / Г.Г. Валявин, В.П. Запорин, М.И. Стуков, М.В. Мамаев, Л.А. Смирнов, А.Ю. Чернавин, Д.А. Чернавин, С.В. Филатов // Труды V конгресса с международным участием и конференции молодых ученых «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований. Уральский рынок лома, промышленных и коммунальных отходов». – 2017. – С. 214-217.

395. Исследование влияния реакционной способности кокса на показатели размягчения – плавления агломерата путем использования методики совместной оценки поведения в ДП углеродсодержащих и железорудных компонентов шихты / Sunahara Kohei, Natsui Takuya, Shizawa Kyoichiro, Ujisawa Yutaka // J. Iron and Steel Inst. Jap. – 2012. – №7. – С. 331-340.

396. Ковальчик, Р.В. Теоретическая оценка влияния горячей прочности кокса на CSR на его удельный расход в доменной плавке // Р.В. Ковальчик, А.А. Томаш // Вестник Приазов. держ. техн. ун-ту. – 2008. – №18. – С. 15-18.

397. Особенности формирования чугуна и шлака на коксе из «Добавки коксующей» / Д.А. Чернавин, С.А. Косоголов, М.И. Стуков, М.И. Мамаев // Труды научно-практической конференции с международным участием и элементами школы для молодых ученых, Екатеринбург, 1-4 окт. – 2013. С. 135-139.

398. Практические задачи доменной плавки и математическое моделирование / А.Н. Дмитриев, Я.М. Гордон, М.О. Зототых, Г.Ю. Витькина // AISTech Conference Proceedings, Pittsburgh, 16-19 May, 2016. – С. 370 – 305.

399. Изменение свойств кокса при высокой температуре в присутствии  $H_2O$  and  $CO_2$  / Wang Ping, Zhang Yue-qiang, Long Hong-ming, Wei Ru-fei et al. // ISIJ Int. 2017. 57. – №4. С. 643-648.

400. Модель для определения потерь углерода в доменной печи / Yao Shun, Wu Shengli, Song Bo, Kou Mingyin et al. // AISTech Conference Proceedings, Philadelphia, Tenn., 7-10 May, 2018 – С. 489 – 496.

401. Реакционная способность кокса CRI и горячая прочность кокса CSR как один из основных показателей качества металлургического кокса для производства чугуна / А.В. Анисимова, И.И. Мельников, Е.Н. Степанов, А.Ю. Рослый, О.В. Чуйкина, Д.А. Мезин // Материалы 65 Научно-технической конференции МГТУ-ММК по итогам научно-исследовательских работ за 2006-2007 гг.: сб. докл. – Т. 1. – Магнитогорск, 2007. – С. 84-86.

402. Связь параметров отражения с показателями реакционной способности CRI и прочности после реакции CSR кокса из углей Верхнесилезского угольного бассейна, Польша // Новости черной металлургии за рубежом. – 2013. – № 5. – С. 9-14.

403. Филатов, С.В. Продление компании доменной печи при ее интенсивной работе / С.В. Филатов, И.Ф. Курунов, Я.М. Гордон, Д.Н. Тихонов и др. // Металлург. – 2016. – №9. – С. 17-22.

404. Исследование влияния реакционной способности и горячей прочности кокса на показатели работы доменных печей Магнитогорского металлургического комбината / Н.С. Штафиенко, А.В. Чевычелов, В.П. Гридасов и др. // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». – 2009. – №3. – С. 29-32.

405. Влияние компонентного состава шихты и ее спекающих свойств на горячую прочность кокса и работу доменных печей. / Г.Р. Гайниева, Л.Д.Никитин, М.М. Наймарк, Н.Н.Назаров, Г.П. Ткаченко // Кокс и химия. – 2008. – №10. – С.20-23.

406. Влияние термической прочности и реакционной способности кокса на показатели доменной плавки / О.П. Онорин, Ю.П. Щукин, В. В. Филиппов, В.С. Рудин // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». – 2005. – №11. – С.31-33.

407. Вейнский, В.В. Реакционная способность кокса и ее роль в доменном процессе / В.В. Вейнский, М.А. Шерстобитов // Известия вузов. Черная металлургия. – 1994. – №8. – С. 3-6.

408. Влияние реакционной способности (CRI) и горячей прочности (CSR) кокса на работу доменных печей / Н.В. Титов, В.Л. Емельянов, В.И. Басов, О.В. Федорова // Современная металлургия начала нового тысячелетия: матер. 2 Международной научно-технической конференции, Липецк, 3-7 окт. – 2005. – С. 93-98.

409. Исследование влияния реакционной способности кокса на показатели работы доменных печей / В.П. Лялюк, В.А. Шеремет, А.К. Тараканов, Д.А. Кассим, А.В. Кекух, П.И. Оторвин // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – №5. – С. 3-7.

410. Моделирование реакции газификации углерода в зоне когезии доменной печи / Xu Guo-zhong, Chen De-hao, Zhou Shi-rong, Mao Qing-long // J. Anshan Univ. Sci. and Technol. – 2003. – №1. – С. 48-51.

411. Взаимосвязь показателей качества доменного кокса / Н.И. Юрин, О.С. Морозов, О.Л. Лихачева, В.И. Юхименко, С.А. Штекер // Сталь. – 2011. – №9. – С. 8-10.

412. Анализ влияния горячей прочности кокса CSR на показатели работы доменных печей / С.В. Филатов, И.Ф. Курунов, В.Н. Титов, А.М. Логинов // Сталь. – 2014. – №10. – С. 10-14.

413. Дмитриев, А.Н. Формирование качества кокса за счет изменения состава угольной шихты для коксования, влияние качества кокса на его расход в доменной плавке и производительность / А.Н. Дмитриев // Черная металлургия. – 2018. – № 4 (1420). – С. 40-45.

414. Качество кокса и технология доменной плавки / С.В. Филатов, И.Ф. Курунов, Д.В. Ворсина, Д.Н. Тихонов // Чер. металлургия. 2016. – №9. – С. 48-50.

415. Оптимизация состава и качества шихты НТМК для получения кокса высокого качества по показателям CSR и CRI и оценки их влияния на работу доменной печи №6 / Ю.А. Золотухин, Я.Б. Куколев, Н.С. Андрейчиков, Р.Р. Гилязетдинов // Черная металлургия. – 2006. – №1. – С. 30-35.

416. О взаимосвязи качества кокса с основными технологическими показателями доменной плавки / Н.К. Беркутов, Ю.В. Степанов, Н.К. Попова, Ю.П. Петренко, В.В. Белов // Сталь. – 2007. – №5. – С. 10-12.

417. Оптимизация угольной базы коксования ОАО «НТМК» для достижения мирового уровня показателей CSR и CRI кокса / А.В. Кушнарев, А.А. Киричков, Н.А. Беркутов, Р.Р. Гилязетдинов, Ю.А. Золотухин // Сталь. – 2007. – №11. – С. 54-58.

418. Исследование влияния реакционной способности, прочности и истираемости кокса на показатели работы доменных печей / В.П. Лялюк, В.А. Шеремет, А.К. Тараканов, А.В. Кекух и др. // Труды третьего международного конгресса по аглококсодоменному производством. Украина, Ялта, 2010. – С. 50-67.

419. Исследования влияния реакционной способности, прочности и истираемости кокса на показатели работы доменных печей / В.П. Лялюк, В.А. Шеремет, А.К. Тараканов, А.В. Кекух, В.С. Листопадов, П.И. Оторвин, Д.А. Кассим // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». – 2010. – №8. – С.14-21.

420. Близнюков, А.С. Свойства кокса в доменной печи и их влияние на технико-экономические показатели плавки / А.С. Близнюков // Новости черной металлургии за рубежом. – 2007. – №5. – С. 18-23.

421. Лялюк, В.П. Влияние реакционной способности кокса на технико-экономические показатели доменной плавки / В.П. Лялюк, А.К. Тараканов, Д.А. Кассим // Кокс и химия. – 2011. – №2. – С. 16-22.

422. Повышение эффективности работы доменного производства ОАО «Тулачермет» / В.В. Титов, О.С. Морозов, С.С. Черепяхин, В.И. Юхименко, Е.А. Кошелев // Сталь. – 2003. – №6. – С. 28-30.

423. Гайниева, Г.Р. Технологическая ценность углей, их влияние на свойства кокса и работу доменных печей / Г.Р. Гайниева, Л.Д. Никитин // Сталь. – 2007. – №10. – С. 6-8.

424. Гайниева, Г.Р. Технологическая ценность углей, их влияние на свойства кокса и работу доменных печей / Г.Р. Гайниева, Л.Д. Никитин // Сталь. – №10. – С. 9-10.

425. Савелов, Н.И. Качество кокса для доменных печей с высокой производительностью и низким его расходом // Новости черной металлургии за рубежом. – 1997. – №2. – С. 30-32.

426. Эффективность применения кокса улучшенного качества («ПРЕМИУМ») / А.И. Коломийченко, Е.Т. Ковалев, С.Л. Ярошевский, Ю.В. Филатов // Труды третьего международного конгресса по аглококсодоменному производствам, Украина, Ялта, 2010. – С. 21-32.

427. Стефанович, М.А. Закономерности движения шихты и газа в доменной печи / М.А. Стефанович, С.К. Сибгатуллин, Д.Н. Гушин. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. – 161 с.

428. Спириин, Н.А. Методы планирования и обработки результатов эксперимента / Н.А. Спириин, В.В. Лавров. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 257 с.

429. Большев, Л.Н. Таблицы математической статистики / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. – М.: Наука, 1983. – 416 с.

430. Neterr J, Wasserman W, Kuntez M. Applied linear regression models. Homewood, IL: Irwin, 1989.

431. Изучение закономерностей выпуска шихтовых материалов из бункера БЗУ лоткового типа / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко, С.Р. Миникаев и др. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: сб. докл. 72-й междунар. научно-технической конференции. – Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2014. – Т.1. – С. 173-176.

432. Сибгатуллин, С.К. Выявление рациональной последовательности набора компонентов сырья в бункер БЗУ лоткового типа физическим моделированием / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2015. – № 3. – С. 28-34.

433. Рациональное размещение материалов в шихтовом бункере компактного бесконусного загрузочного устройства / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко, Е.О. Теплых, В.А. Бегинюк, М.А. Семенюк, Д.Н. Гуцин // Metallurgical processes and equipment. – 2014. – № 1. – С. 27-32.

434. Влияние расположения окатышей в слое агломерата в бункере компактного БЗУ на равномерность их поступления в колошниковое пространство печи / Е.О. Теплых, С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко и др. // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сб. докл. 2-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2013) с международным участием. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2013. – С. 106-109.

435. Изучение закономерностей выпуска шихтовых материалов из бункера БЗУ лоткового типа / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко, С.Р. Миникаев и др. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: сб. докл. 72-й междунар. научно-технической конференции. Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2014. – Т.1. – С. 173-176.

436. Зависимость равномерности поступления агломерата и окатышей в колошниковое пространство печи от последовательности размещения их в бункере БЗУ / С.К. Сибгатуллин, Е.О. Теплых, А.С. Харченко и др. // Теория и технология металлургического производства. – 2012. – № 12. – С. 16-21.

437. Определение коэффициента однородности по видам и крупности компонентов шихты, поступающих из бункера БЗУ в колошниковое пространство доменной печи: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015617267 от 06.07.2015. / В.М. Колокольцев, С.К. Сibaгатуллин, А.С. Харченко и др.

438. Выявление рационального режима набора агломерата и окатышей в бункер БЗУ лоткового типа, обеспечивающего однородное по крупности поступление их в колошниковое пространство доменной печи: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018661555 от 07.09.2018. / А.С. Харченко, С.К. Сibaгатуллин и др.

439. Действие различных факторов на равномерность поступления шихтовых материалов по крупности из бункера БЗУ лоткового типа / С.К. Сibaгатуллин, А.С. Харченко, В.А. Бегинюк и др. // Теория и технология металлургического производства. – 2016. – № 2 (19). – С. 8-12.

440. Харченко, А.С. Выявление закономерностей совместного поступления агломерата и окатышей из бункера БЗУ лоткового типа в колошниковое пространство печи физическим моделированием / А.С. Харченко // Черная металлургия. – 2019. – № 1. – С. 37-47.

441. Влияние расхода окатышей на равномерность поступления компонентов шихты из бункера БЗУ лоткового типа / С.К. Сibaгатуллин, А.С. Харченко, М.В. Сидоров и др. // Наука и производство Урала. – 2014. – № 10. – С. 5-7.

442. Расчет коэффициента равномерности поступления агломерата и окатышей из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи при различных условиях загрузки: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660756 от 28.08.2018. / А.С. Харченко, С.К. Сibaгатуллин и др.

443. Определение рационального режима загрузки шихтовых материалов в колошниковое пространство доменной печи, оснащенной БЗУ лоткового типа: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №

2015617266 от 06.07.2015. / В.М. Колокольцев, С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко и др.

444. Выявление рациональных режимов загрузки железорудных материалов в колошниковое пространство печи при повышенной доле окатышей в шихте / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, М.М. Кашапов и др. // Теория и технология металлургического производства. – 2017. – № 3 (22). – С. 4-9.

445. Харченко, А.С. Поступление коксового орешка совместно с агломератом и окатышами из шихтового бункера БЗУ в колошниковое пространство доменной печи / А.С. Харченко, С.К. Сибатуллин, Н.П. Сысоев // Поступление коксового орешка совместно с агломератом и окатышами из шихтового бункера БЗУ в колошниковое пространство доменной печи // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2011. – № 8. – С. 18-19.

446. Сибатуллин, С.К. Выявление рационального режима загрузки коксового орешка в доменную печь компактным загрузочным устройством лоткового типа / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, Г.Н. Логачев // Черная металлургия. – 2016. – № 9 (1401). – С. 56-64.

447. Влияние различных факторов на равномерность распределения коксового орешка в колошниковом пространстве доменной печи, оснащенной БЗУ лоткового типа / А.С. Харченко, С.К. Сибатуллин, Е.О. Теплых и др. // Теория и технология металлургического производства. – 2010. – №1. – С. 33-38.

448. Сибатуллин, С.К. Физическое моделирование применяемых в ОАО «ММК» режимов загрузки шихты в бункер БЗУ / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве (ТИМ-2015): сб. докл. 4-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. – Екатеринбург: ФГОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2015. – С. 143-146.

449. Сибатуллин, С.К. Использование коксового орешка на доменных печах / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. – 162 с.

450. Определение рационального режима загрузки коксового орешка в колошниковое пространство доменной печи, оснащенной БЗУ лоткового типа: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616895 от 6.09.2011 / В.М. Колокольцев, С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко и др.

451. Выявление источников неравномерного распределения компонентов железорудной шихты, загружаемой в доменную печь / С.К. Сибатуллин, А.С. Савинов, А.С. Харченко, Л.Д. Девятченко // Черная металлургия. – 2017. – № 12. – С. 30-36.

452. Sibagatullin, S.K. Improvement of iron ore burden components distribution when charging into blast furnace top by physical and mathematical modeling of fixed effects / S.K. Sibagatullin, A.S. Kharchenko, L.D. Devyatchenko, V.L. Steblyanko // Journal of chemical technology and metallurgy. – 2017. – № 4. – Pp. 694-701.

453. Математика: энциклопедия / под. ред. Ю.В. Прохорова. – М.: Большая Российская энциклопедия, 2003. – 845 с.

454. Девятченко, Л.Д. Таблицы сопряженности. Введение в анализ соответствий / Л.Д. Девятченко. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2008. – 127 с.

455. Кендалл, М. Статистические выводы и связи / М. Кендалл, А. Стьюарт. – М.: Наука, 1976. – 736 с.

456. Математическая энциклопедия / гл. ред. И.М. Виноградов. Т. 5. Слу-Я. – М.: Советская энциклопедия. – 1248 стб.

457. Сибатуллин, С.К. Оценка неравномерности распределения шихтовых материалов в доменной печи / Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Девятченко Л.Д. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2018. – № 10. – С. 766-773.

458. Влияние последовательности загрузки компонентов шихты в бункер компактного БЗУ на эффективность работы доменной печи / А.В. Чевычелов, М.Н. Евстафьев, В.А. Бегинюк., С.К. Сибатуллин, Е.О. Теплых, А.С. Харченко // Черные металлы. – 2012. – № 5. – С. 43-45.

459. Харченко, А.С. Применение кокса мелких фракций в доменном производстве / А.С. Харченко, С.К. Сибатуллин, Г.Н. Логачев // Литейные процессы. – 2014. – № 13. – С. 30-35.

460. Повышение полноты использования кокса на доменных печах / С.К. Сибатуллин, В.Л. Терентьев, А.С. Харченко и др. // Наука и производство Урала. – 2012. – № 8. – С. 13-17.

461. Сибатуллин, С.К. Влияние ввода коксового орешка в шихту доменных печей на показатели хода восстановления железа из оксидов / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, А.В. Чевычелов // Инновации в материаловедении и металлургии: сб. труд. 4-й Международной интерактивной научно-практической конференции. – Екатеринбург: ФГОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2015. – С. 51-55.

462. Кропотов, В.К. Оценка дренажной способности кокса в горне доменных печей // Производство чугуна: межвузовский сборник. – Магнитогорск: МГМИ, 1987. – С. 109–119.

463. Куликов, И.С. Десульфурация чугуна / И.С. Куликов. – М.: Металлургия, 1962. – 306 с.

464. Blast furnace performance improved through optimum radial distribution of materials at the top while changing the charging pattern / S.K. Sibagatullin, A.S. Kharchenko, G.Yu. Savchenko, V.A. Beginyuk // CIS Iron and Steel Review. – 2018 – Т. 16. – № 2. – P. 11-15.

465. Пат. 2700977 Российская Федерация, МПК C21B5/00. Способ загрузки доменной печи / А.С. Харченко, С.К. Сибатуллин, А.А. Полинов, М.А. и др; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» - № 2018147577; опубл. 24.09.2019 Бюл. № 27.

466. Sibagatullin, S.K. The rational mode of nut coke charging into the blast furnace by compact trough-type charging device / S.K. Sibagatullin, A.S. Kharchenko, G.N. Logachev // The international journal of advanced manufacturing technology. – 2016. – № 1-4. – P. 531-537.

467. Charging coke nuts in the batch bunker / A.V. Chevychelov, A.V. Pavlov, E.O. Teplykh, A.S. Kharchenko, S.K. Sibagatullin // *Steel in translation*. – 2013. – № 7. – P. 434-435.

468. Sibagatullin, S.K. Processing solutions for optimum implementation of blast furnace operation / S.K. Sibagatullin, A.S. Kharchenko, V.A. Beginyuk // *Metallurgist*. – 2014. – № 3-4. – P. 285-293.

469. Улучшение работы доменной печи воздействием на соотношения расходов природного газа и дутья по фурмам / С.К. Сибэгатуллин, А.С. Харченко, С.Р. Миникаев и др. // *Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло: история, современное состояние, будущее: сб. докл. Международной научно-практической конференции*. – Екатеринбург: ФГОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2014. – С. 110-114.

470. Улучшение работы доменной печи воздействием на соотношения расходов природного газа и дутья по фурмам / С.К. Сибэгатуллин, А.С. Харченко, С.Р. Миникаев и др. // *Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сб. докл. III Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2014) с международным участием*. – Екатеринбург: ФГОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2014. – С. 88-92.

471. Сибэгатуллин, С.К. Стабилизация соотношения расходов природного газа и дутья по фурмам доменной печи / С.К. Сибэгатуллин, А.С. Харченко, А.А. Полинов А.А. и др. // *Теория и технология металлургического производства*. – 2014. – № 1 (14). – С. 23-25.

472. Сибэгатуллин, С.К. Повышение равномерности соотношения расходов природного газа и дутья по фурмам доменной печи / С.К. Сибэгатуллин, А.С. Харченко, В.А. Бегинюк // *Наука и производство Урала*. – 2015. – № 11. – С. 33-35.

473. Влияние стабилизации соотношения расходов природного газа и дутья по фурмам на показатели работы доменной печи / С.К. Сибэгатуллин, А.С. Харченко, В.А. Бегинюк и др. // *Актуальные проблемы современной науки*,

техники и образования: сб. докл. 72-й междунар. научно-технической конференции. – Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2014. – Т.1. – С. 169-172.

474. Влияние матрицы загрузки на тепловые нагрузки системы охлаждения доменных печей, оснащенных коактным БЗУ лоткового типа / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко, Е.О. Харченко и др. // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: сб. 12-й Всероссийской научно-практической конференции. – Старый Оскол, 2015. – Т.1 – С. 108-113.

475. Влияние режимов загрузки компактным БЗУ лоткового типа на тепловые нагрузки системы охлаждения доменных печей / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко, Е.О. Харченко и др. // Metallurgy: technologies, innovations, quality: сб. труд. 19-й Международной научно-практической конференции. – Новокузнецк. СИБГИУ, 2015. – С. 27-31.

476. Влияние загруженности пристеночной зоны доменных печей железорудным сырьем на тепловые нагрузки системы охлаждения / А.С. Харченко, Е.О. Харченко, М.В. Сидоров и др. // Теория и технология металлургического производства. – 2015. – № 2 (17). – С. 15-18.

477. Исследование действия расхода окатышей на стойкость футеровки доменной печи / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко, Е.О. Харченко и др. // Литейные процессы. – 2015. – № 14. – С. 59-67.

478. Сибгатуллин, С.К. Действие режимов загрузки компонентов шихты в доменную печь на тепловые нагрузки системы охлаждения / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: сб. докл. 74-й междунар. научно-технической конференции. – Магнитогорск: ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2016. – Т.1. – С. 130-133.

479. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки: монография / Н.А. Спиринов, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, и др.; под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УрФУ, 2010. – 462 с.

480. Спирин, Н.А. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / Н.А. Спирин. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2005. – 301 с.

481. Пузанов, В.П. Структурообразование из мелких материалов с участием жидких фаз: монография / В.П. Пузанов, В.А. Кобелев. – Екатеринбург, 2001. – 634 с.

482. Распределение титана по продуктам при выплавке передельного чугуна, содержащего 0,5-0,8% кремния / С.К. Сибгатуллин, Н.А. Бидненко, А.С. Харченко и др. // Теория и технология металлургического производства. – 2012. – № 12. – С. 36-42.

483. Степень перехода титана в передельный чугун в условиях ОАО «ММК» / С.К. Сибгатуллин, Н.А. Бидненко, А.С. Харченко и др. // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сб. 9-й научно-практической конференции. – Липецк: ФГБОУ ВПО «ЛГТУ», 2012. – С. 20-25.

484. Девятченко, Л.Д. Главные компоненты информационных матриц. Введение в факторный анализ / Л.Д. Девятченко. – Магнитогорск: МГТУ, 2000. – 95 с.

485. Боровиков, В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов / В. Боровиков. – 2-е изд. – Спб.: Питер, 2003. – 688 с.

486. Соотношение удельных расходов кокса и природного газа в зависимости от условий работы доменной печи, оснащенной БЗУ лоткового типа / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко, В.А. Шаган, В.А. Бегинюк, М.А. Семенюк // Черная металлургия. – 2017. – № 8. – С. 32-42.

487. Методы определения качества кокса и их сравнительная оценка / Е.Н. Степанов, Д.А. Мезин, О.В. Чуйкина и др. // Кокс и химия. – 2011. – № 12. – С. 24-26.

488. Quality comparison of coke nuts / S.K. Sibgatulin, A.S. Kharchenko, E.O. Teplykh, E.N. Stepanov, D.A. Mezin, V.B. Fetisov // Coke and chemistry. – 2012. – № 2. – P. 62-65.

489. Прочностные характеристики коксового орешка различного происхождения / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко, Е.О. Теплых и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2012. – № 1. – С. 19-21.

490. Сибгатуллин, С.К. Изучение прочностных характеристик коксового орешка различного вида / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко // Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР: тр. научно-практической конференции с международным участием и элементами школ молодых ученых. – Екатеринбург: Уральский рабочий, 2015. – С. 139-143.

491. Influence of coke nut introduction in blast furnace charge on melting parameters / M.V. Chukin, S.K. Sibgatullin, A.S. Kharchenko, V.P. Chernov, G.N. Logachev // CIS iron and steel review. – 2016. – № 2. – P. 9-13.

492. Использование коксового орешка на доменных печах в зависимости от расположения определяющей зоны по силовому взаимодействию потоков шихты и газа / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко, М.А. Семенюк и др. // Теория и технология металлургического производства. – 2013. – № 1 (13). – С. 16-18.

493. Использование коксового орешка на доменных печах, оснащенных компактным БЗУ лоткового типа, в зависимости от условий хода процесса / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко, Е.О. Теплых, А.В. Чевычелов, В.А. Бегинюк // Металлургические процессы и оборудование. – 2013. – № 4. – С. 55-61.

494. A development of the adaptive technology of sinter production at PJSC MMK / Sibgatullin, S.K., Kharchenko, A.S., Savinov, A.S., Gushchin, D.N., Mazur, I.P. // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2018 – Т. 53. – № 5. – P. 990-994.

495. Совершенствование хода доменного процесса повышением расхода природного газа по газодинамике в верхней ступени теплообмена / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко, В.А. Бегинюк, В.Н. Селиванов, В.П. Чернов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2017. – № 1. – С. 37-44.

496. Совершенствование доменного процесса за счет создания условий для увеличения потребления природного газа применением сырья повышенной прочности / С.К. Сibaгатуллин, А.С. Харченко, В.П. Чернов, В.А. Бегинюк // Черные металлы. – 2017. – № 8. – С. 27-33.

497. Панишев, Н.В. Изучение возможности вовлечения в металлургическое производство марганецсодержащего сырья Южного Урала / Панишев Н.В., Харченко А.С., Бигеев В.А., Потапова М.В., Закуцкая Л.А. // Известия Волгоградского государственного технического университета. - 2019. - Т.230. - №7. - С. 31-37.

498. Промывка горна доменной печи кремнеземо-марганцовистой рудой Ниязгуловского месторождения / В.А. Бигеев, С.К. Сibaгатуллин, А.С. Харченко, Н.В. Панишев и др. // Теория и технология металлургического производства. – 2018. – № 3 (26). – С. 12-16.

499. Разработка и испытание локального режима промывки доменной печи новым кремнеземомарганцовистым материалов / С.К. Сibaгатуллин, А.С. Харченко, Г.Ю. Савченко и др. // Современные достижения университетских научных школ: сб. докл. научн. школы-конференции. – Магнитогорск: ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2017. – № 2. – С. 9-12.

500. Титов, В.Н. Количественная оценка различных факторов на дренажную способность горна / В.Н. Титов, В.И. Басов // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сб. научн. тр. Ч. 2. – Липецк, 2007. – С. 188-193.

501. Влияние коксового орешка на фильтрацию жидких продуктов плавки в горне доменной печи / С.К. Сibaгатуллин, А.С. Харченко, А.В. Чевычелов и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2010. – № 4. – С. 26-28.

502. Результаты совместного использования в доменной печи коксового орешка с одновременным улучшением качества скипового кокса / С.К. Сibaгатуллин, А.С. Харченко, А.А. Полинов и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2010. – № 2. – С. 24-27.

503. Сибгатуллин, С.К. Рациональное использование коксового орешка на доменных печах с компактным БЗУ лоткового типа / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко, В.А. Бегинюк // Сталь. – 2014. – № 4. – С. 10-13.

504. Использование коксового орешка в шихте доменной печи с компенсацией его негативного воздействия на дренаж продуктов плавки / В.А. Гостенин, С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко и др. // Труды третьего международного конгресса по аглококсодоменному производствам, Украина, Ялта, 2010. – С. 143-152.

505. Повышение эффективности работы доменных печей, использующих в шихте коксовый орешек / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко, Е.О. Теплых и др. // Четвертый международный промышленный форум «Реконструкция промышленных предприятий – прорывные технологии в металлургии и машиностроении». – Челябинск, 2011. – С. 149 – 151.

506. Сибгатуллин, С.К. Приложение Марковских цепей к анализу эффективности работы доменной печи / Сибгатуллин С.К., Харченко А.С., Девятченко Л.Д. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2018. – № 8. – С. 649-656.

507. Андросенко, О.С. Постановка и решение задач Марковских процессов в формате программы WinQSB / О.С. Андросенко, Л.Д. Девятченко, Е.П. Маяченко // Математика. Приложение математики в экономических, технических и педагогических исследованиях: сб. науч. тр. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – Вып. 4. – С. 3-13.

508. Derman, C. Finite State Markov an Decision Process, Academic Press, New York, 1970.

509. Гантмахер, Ф.Р. Теория матриц / Ф.Р. Гантмахер. – 4-е изд. – М.: Наука, 1988.

510. Тахо, Хемди А. Введение в исследование операций: пер. с англ. / Хемди А. Тахо. – 7-е изд. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005.

511. Харченко, А.С. Использование нейросетевого моделирования для изучения газодинамического режима в нижней части доменной печи в условиях

ее работы с коксовым орешком / А.С. Харченко, С.К. Сибатуллин, А.В. Колосов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2011. – № 11. – С. 23-26.

512. Sibagatullin, S.K. Neural network modeling of coefficient of burden resistance to the gas movement in the lower part of the blast furnace in conditions of operation with coke nut / S.K. Sibagatullin, A.S. Kharchenko, M.V. Potarova // Materials science forum. – 2016. – Т. 870. – Р. 487-491.

513. Определяющие процессы и зоны доменной печи / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, В.В. Бултаков др. // Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло: история, современное состояние, будущее: сб. докл. Международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: ФГОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2014. – С. 411-118.

514. Целесообразность комплексирования минералого-аналитических методов изучения металлургических шлаков / Е.А. Горбатова, Е.Г. Ожогина, А.Н. Лебедев, Е.А. Емельяненко, А.С. Харченко, В.Н. Селиванов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2017. – № 4. – С. 31-39.

515. Действие расхода природного газа на коэффициент сопротивления шихты в зависимости от условий хода доменной плавки / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, Е.О. Харченко и др. // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. – 2016. – № 15. – С. 36-42.

516. Улучшение работы доменной печи кратковременным уменьшением расхода природного газа / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, Е.О. Харченко, М.И. Сибатуллина, С.Р. Миникаев, В.А. Бегинюк // Черная металлургия. – 2017. – № 2. – С. 16-20.

517. Уменьшение потребности в коксе на выплавку чугуна в доменной печи изменением расхода природного газа / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, Г.Ю. Савченко и др. // Современные достижения университетских научных школ: сб. докл. научн. школы-конференции. – Магнитогорск: ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2016. – № 1. – С. 12-15.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### ПРИЛОЖЕНИЕ 1

УТВЕРЖДАЮ  
 Главный специалист группы  
 по развитию НТЦ ПАО «ММК»  
 С.В. Денисов  
 «20» 03 2019 г.

#### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

**результатов работ по договору № 236010 от 09.07.2018 с  
 ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»**

**по теме:** «Анализ и выявление закономерностей работы с определением критериев оценки работы доменных печей ПАО «ММК» при удельном расходе природного газа выше 120 м<sup>3</sup>/т чугуна».

Данная работа проводится в соответствии с главой IV «Рациональное природопользование», пунктом 1 «Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнений» статьей 20 «Разработка технологий по повышению степени использования сырьевого потенциала техногенных образований и отходов» «Перечня научных исследований и опытно-конструкторских разработок, расходы налогоплательщика на которые в соответствии с п. 7 ст. 262 части второй НК РФ включаются в состав прочих расходов в размере фактических затрат с коэффициентом 1,5», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.12.2008 №988 (в ред. Постановлений Правительства РФ от 13.10.2011 №836, от 06.02.2012 №96).

#### Краткое описание выполненной работы

Исследованиями на доменных печах и математическим моделированием в условиях расхода природного газа выше 120 м<sup>3</sup>/т чугуна установлены рациональные пределы соотношения расходов природного газа и всего поступающего в зону горения кислорода, учитывающие реакционную способность кокса CRI.

Они составляют:

- 0,30-0,33 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> при величине показателя CRI 30-33%;
- 0,33-0,40 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> при величине показателя CRI 33-35%;
- 0,40-0,44 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> при величине показателя CRI 35-40 % и выше.

При CRI более 40% соотношение расходов природного газа и кислорода целесообразно поддерживать на уровне 0,40-0,44 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Дальнейшее увеличение соотношения расходов природного газа и кислорода более 0,44 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> ограничивается минимально допустимой величиной теоретической температуры горения и уменьшением эффективности использования природного газа.

Исследования и тестовые испытания разработанной технологии проведены на доменных печах № 4 и 6 ПАО «ММК». Переход на выявленный рациональный дутьевой режим при изменении показателей качества кокса по CRI уменьшал удельный расход кокса в соответствии с техническим заданием.

**Полученный результат**

Применительно к доменным печам ПАО «ММК» внедрена технология управления дутьевым режимом, обеспечивающая уменьшение удельного расхода кокса в соответствии с техническим заданием.

Подготовлен проект дополнения в технологическую инструкцию ТИ 101-Д-22-2014.

РИД, способные к правовой охране: не создавались.

Дата фактического внедрения «10» 03 2019 г.

Срок полезного использования: 5 лет

Начальник доменного цеха

А.А. Полинов

Научные руководители:

С.К. Сибигатуллин

СОГЛАСОВАНО:

Главный металлург

А.С. Харченко

Главный специалист НТЦ

(по аглококсодоменному производству)

Д.В. Рабаджи

А.В. Колосов

Ответственный от доменного цеха

Д.И. Селезнев

Куратор договора от НТЦ

Л.П. Добрынина

19.03.2019

= Брижмент

УТВЕРЖДАЮ  
 Главный специалист группы  
 по развитию НТЦ ПАО «ММК»

С.В. Денисов  
 « 15 » 03 2019 г.



### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

**результатов работ по договору № 236011 от 09.07.2018 с  
 ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»**

**по теме: «Разработка и внедрение системы загрузки доменных печей, оборудованных БЗУ, позволяющей оптимизировать их работу при изменении газодинамических и сырьевых условий».**

Данная работа проводится в соответствии с главой IV «Рациональное природопользование», пунктом 1 «Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнений» статьей 20 «Разработка технологий по повышению степени использования сырьевого потенциала техногенных образований и отходов» «Перечня научных исследований и опытно-конструкторских разработок, расходы налогоплательщика на которые в соответствии с п. 7 ст. 262 части второй НК РФ включаются в состав прочих расходов в размере фактических затрат с коэффициентом 1,5», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.12.2008 №988 (в ред. Постановлений Правительства РФ от 13.10.2011 №836, от 06.02.2012 №96).

#### Краткое описание выполненной работы

Исследованиями на доменных печах, физическим и математическим моделированием разработаны и внедрены:

1. Системы загрузки, обеспечивающие заданное размещение окатышей, поступающих из бункера БЗУ совместно с агломератом и другими компонентами железорудного сырья, для повышения производительности и снижения удельного расхода кокса:

- в пристеночной зоне колошника;
- в зоне рудного гребня;
- со смещением в осевую зону;
- с созданием локальной однородной смеси.

2. Специальные системы загрузки для использования в особых режимах ведения доменной плавки:

- предназначенные для удаления настыли;
- обеспечивающие сохранение целостности футеровки шахты, распара и заплечиков при работе с повышенной долей окатышей, превышающей 40-45%;
- предназначенные для формирования гарнисажа.

3. Программный продукт, позволяющий отображать распределение железорудного сырья и кокса по радиусу колошника с определением:

- абсолютных величин рудной нагрузки;
- содержания окатышей от массы железорудной части шихты;
- степени уравнивания шихты подъемной силой газового потока;
- коэффициента сопротивления шихты движению газа в доменной печи.

Исследования и тестовые испытания разработанных режимов загрузки проведены на доменных печах № 2, 4, 6 и 9 ПАО «ММК». Переход на выявленные рациональные режимы загрузки уменьшал

удельный расход кокса и повышал производительность в соответствии с техническим заданием.

**Полученный результат**

Применительно к доменным печам ПАО «ММК», оборудованных БЗУ, внедрены системы загрузки, позволяющие оптимизировать их работу при изменении газодинамических и сырьевых условий, что обеспечивает уменьшение удельного расхода кокса и повышение производительности в соответствии с техническим заданием.

Подготовлен проект дополнения в технологическую инструкцию ТИ 101-Д-22-2014.

РИД, способные к правовой охране: подготовлена и представлена в НТЦ ПАО «ММК» заявка на способ доменной плавки для государственной регистрации.

Дата фактического внедрения «19» 03 2019 г.

Срок полезного использования: 5 лет

Начальник доменного цеха

А.А. Полинов

Научные руководители:

С.К. Сибэгатуллин

СОГЛАСОВАНО:

А.С. Харченко

Главный металлург

Д.В. Рабаджи

Главный специалист НТЦ

(по аглококсодоменному производству)

А.В. Колосов

Ответственный от доменного цеха

Д.И. Селезнев

Куратор договора от НТЦ

Л.П. Добрынина

19.03.2019

*Алсу-Григорьевна*



### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

**результатов работ по договору № 234081 от 28.12.2017 с  
 ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»**

**по теме: «Разработка рациональной технологии загрузки  
 промывочных материалов в доменные печи ПАО «ММК», оснащенные БЗУ  
 лоткового типа».**

Данная работа проводится в соответствии с главой IV «Рациональное природопользование», пунктом 1 «Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнений» статьей 20 «Разработка технологий по повышению степени использования сырьевого потенциала техногенных образований и отходов» «Перечня научных исследований и опытно-конструкторских разработок, расходы налогоплательщика на которые в соответствии с п. 7 ст. 262 части второй НК РФ включаются в состав прочих расходов в размере фактических затрат с коэффициентом 1,5», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.12.2008 №988 (в ред. Постановлений Правительства РФ от 13.10.2011 №836, от 06.02.2012 №96).

#### **Краткое описание выполненной работы**

Разработаны и внедрены технологии загрузки материалов, обеспечивающие рациональную промывку локальных зон горна с наилучшей дренажной способностью коксовой насадки, применительно к доменным печам, оснащенным БЗУ лоткового типа.

Исследованиями на доменных печах, физическим и математическим моделированием установлено, что рациональная технология включает локальный режим загрузки промывочных материалов в колошниковое пространство доменных печей после выявления загромождения горна по признакам п. 7.5.3 технологической инструкции.

Локальный режим предусматривает загрузку промывочных материалов в зависимости от горячей прочности кокса по CSR:

- в зону рудного гребня при поступлении кокса с CSR более 40 %;
- в различные зоны при CSR менее 40 %:

а) к осевой зоне, если CSR составляет менее 90% от средней величины за предшествующие 5 суток;

б) в зону рудного гребня, если CSR составляет более 110% от средней величины за предшествующие 5 суток;

в) равномерно по сечению колошника, если CSR составляет 90 – 110 % от средней величины за предшествующие 5 суток.

Исследования и тестовые испытания разработанных режимов загрузки конвертерного шлака и марганцевой руды в качестве промывочных материалов локальных зон горна проведены на доменных печах № 2, 6 и 10.

Загрузка материалов к осевой зоне печей в количестве 30-40 кг/т чугуна обеспечивало очистку её от спели и мелочи кокса, что улучшало условия дренажа жидких продуктов плавки в горн. Загрузка промывочных материалов в зону рудного гребня в количестве 20-45 кг/т чугуна освобождало её от высокоосновных тугоплавких составляющих ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ,  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), что улучшало условия для движения продуктов плавки, поступавших в горн, к выпускным леткам.

Установленные рациональные режимы загрузки промывочных материалов в локальные зоны увеличили производительность печи в соответствии с техническим заданием.

### Полученный результат

Применительно к доменным печам, оснащенным БЗУ лоткового типа, внедрены режимы загрузки промывочных материалов в локальные зоны колошника, обеспечивающие промывку горна от спели и мелочи кокса, высокоосновных тугоплавких компонентов с увеличением производительности в соответствии с техническим заданием. Подготовлен проект дополнения в технологическую инструкцию ТИ 101-Д-22-2014.

РИД, способные к правовой охране: не создавались.

Дата фактического внедрения « 01 » 12 2018 г.

Срок полезного использования: 5 лет

Начальник доменного цеха

А.А. Полинов

Научные руководители:

С.К. Сibaгатуллин

А.С. Харченко

СОГЛАСОВАНО:

Главный металлург

Д.В. Рабаджи

Главный специалист НТЦ

(по аглококсодоменному производству)

А.В. Колосов

Ответственный от доменного цеха

Д.И. Селезнев

Куратор договора от НТЦ

Л.П. Добрынина

03.12.2018

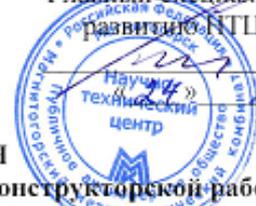
15.11.18 / Бешиков В.А.

УТВЕРЖДАЮ

Главный специалист группы по  
развитию ИТЦ ПАО «ММК»

С.В. Денисов

2017 г.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

**результатов научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы (НИОКР)**  
**по договору № 231624 от 10.04.2017 г. с ФГБОУ ВО «МГТУ» им. Г.И. Носова**  
 по теме: «Разработка оптимального шлакового режима для доменных печей в  
 условиях существующей и перспективной сырьевой базы».

(Данная работа проводится в соответствии с главой IV «Рациональное природопользование», пунктом 1 «Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнений» статьей 20 «Разработка технологий по повышению степени использования сырьевого потенциала техногенных образований и отходов» «Перечня научных исследований и опытно-конструкторских разработок, расходы налогоплательщика на которые в соответствии с п. 7 ст. 262 части второй НК РФ включаются в состав прочих расходов в размере фактических затрат с коэффициентом 1,5», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.12.2008 №988 (в ред. Постановлений Правительства РФ от 13.10.2011 №836, от 06.02.2012 №96).

**Краткое описание выполненной работы**

Разработаны и внедрены шлаковые режимы, обеспечивающие:

- защиту футеровки горна печей формированием гарнисажа;
- повышение производительности печей со снижением удельного расхода кокса.

**Формирование гарнисажа**

На основе исследований на доменных печах цеха и на лабораторных установках разработан способ обеспечения рационального шлакового режима вблизи футеровки горна для формирования защитного гарнисажа. Для этого использованием специальных режимов работы БЗУ лоткового типа загружают материалы, формирующие гарнисаж, в пристеночную зону колошника.

Установлено, что максимальному поступлению материалов, формирующих гарнисаж, в периферийную часть печи соответствует загрузка их в шихтовый бункер БЗУ первыми с последующим открытием его затвора для выгрузки на станциях лотка № 11-9 – при вращении лотка по окружности с одновременным изменением его углового положения.

Загрузка сырья, включающего титаномагнетитовую руду, на периферию доменной печи № 2 в течении 45 суток в количестве, обеспечивающим прирост содержания  $TiO_2$  в шлаке на 0,32%, а  $Ti$  в чугуна на 0,020% при конечном их содержании в продуктах плавки соответственно 1,16 и 0,099%, сопровождалось формированием гарнисажа, что снизило плотность теплового потока по внутренним виткам холодильников на 14,8% по отношению к базовому периоду.

**Повышение производительность печей со снижением удельного расхода кокса.**

На основе исследований, проведенных на доменных печах цеха, лабораторных испытаний по физико-химическим свойствам натуральных шлаков, физического моделирования различных режимов загрузки на установке БЗУ лоткового типа разработаны рациональные шлаковые режимы с содержанием  $MgO$  в пределах 9,5-12%.

Исследования и промышленные опробования по обеспечению рациональных физико-химических свойств шлака (вязкость, температура плавления и др.) проведены на доменных печах № 2, 4, 6, 8, 9.

Разработаны и испытаны специальные режимы загрузки материала с повышенным содержанием  $MgO$ , на примере конвертерного шлака, в слой неофлюсованных окатышей путем размещения его в бункере БЗУ под окатышами и над ними. Кластер «шлак-окатыши» располагают между слоями агломерата: 25 % агломерата под кластером, 75 % над ним.

Установленный рациональный шлаковый режим повысил жидкоподвижность шлака и улучшил технико-экономические показатели работы печей в соответствии с техническим заданием – повышение производительности на 10 т/сутки и снижение удельного расхода кокса на 0,05 кг/т чугуна.

**Полученный результат**

Применительно к доменным печам № 2, 4, 6, 9 и 10 внедрен шлаковый режим, обеспечивающий формирование гарнисажа на футеровке горна, за счёт которого тепловые нагрузки на холодильники доведены до рационального уровня – в интервале 2,5-4,5 ккал/(м<sup>2</sup>·час).

Применительно к доменным печам № 2, 4, 6, 9 и 10 внедрена технология доменной плавки с содержанием MgO в шлаке 9,5-12% путем загрузки специальными режимами материала с повышенным содержанием MgO в слой окатышей, размещая кластер «шлак-окатыши» между слоями агломерата. Получено улучшение технико-экономических показателей в соответствии с техническим заданием – повышение производительности на 10 т/сутки и снижение удельного расхода кокса на 0,05 кг/т чугуна.

Дата фактического внедрения: 1 сентября 2017г.

Срок полезного использования: без ограничения.

Начальник доменного цеха

А.А. Полинов

Научные руководители:

С.К. Сибгатуллин

А.С. Харченко

СОГЛАСОВАНО:

Главный металлург

Д.В. Рабаджи

Главный специалист НТЦ  
(по аглококсодоменному производству)

А.В. Колосов

Ответственный от доменного цеха

Д.И. Селезнев  
на Семенов

А. Гришечкин



УТВЕРЖДАЮ  
Начальник НТЦ ОАО «ММК»

Д.В. Куряев

29.12.2015

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**  
**результатов работ по договору НИРиТР № 224586 от 31.03.2015 г.**  
по теме: «Разработка и освоение рациональных режимов работы доменных печей ОАО «ММК», оборудованных БЗУ, при различной доле окатышей в составе шихты».

**Краткое описание выполненной работы**

На основе исследований, проведенных на доменных печах цеха, и физического моделирования на установке БЗУ лоткового типа разработаны рациональные режимы их работы, обеспечивающие отдаление части окатышей от футеровки, что снижает тепловые нагрузки на систему охлаждения шахты, распара и заплечиков печей.

Установлено, что минимальному поступлению окатышей в периферийную часть соответствует загрузка их в шихтовый бункер БЗУ после агломерата, открытие затвора бункера для выгрузки материалов в колошниковое пространство при вращении лотка по окружности с одновременным изменением его углового положения относительно вертикали от периферии до позиции соответствующей 2/3 радиуса колошника.

Исследования и промышленные опробования разработанных режимов загрузки для сохранения стойкости холодильников и футеровки проведены на доменных печах № 2, 4, 6, 9, 10. Переход на выявленный рациональный режим загрузки на доменной печи № 4, при одновременном увеличении доли окатышей в шихте от 38 до 45%, предотвратил возможное увеличение температуры холодильников шахты, распара и заплечиков на 7,7 °С. Такой режим при постоянной доле окатышей, равной 35%, снизил среднюю температуру холодильников шахты доменной печи № 9 на 3,4 °С. Рациональный температурный интервал для этих печей находился в интервале 40-50 °С.

**Полученный результат**

Применительно к доменным печам № 2, 4, 6, 9 и 10 внедрена технология доменной плавки, обеспечивающая в условиях роста доли окатышей сохранение величины тепловых нагрузок на систему охлаждения шахты, распара и заплечиков на рациональном уровне в пределах 40-50 °С.

Дата фактического внедрения: 1 декабря 2015г.

Срок полезного использования: без ограничения.

Начальник доменного цеха

А.А. Полинов

Научные руководители:

В.М. Колокольцев

С.К. Сивагатуллин

Ответственный исполнитель

А.С. Харченко

Согласовано:

Главный металлург

Д.В. Рабаджи

Главный специалист НТЦ

А.В. Колосов

(по аглококсодоменному производству)

Ответственный от доменного цеха

Д.И. Селезнев

Ответственный от НТЦ

С.Н. Пишинограев

*(Handwritten signature)*

*(Handwritten signature)*

УТВЕРЖДАЮ  
Начальник НТЦ ОАО «ММК»  
Д.В. Куряев



### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов работ по договору НИРиТР № 225255 от 11.06.2015 г.  
по теме: «Влияние горячей прочности окатышей разных производителей на ход доменной плавки и технико-экономические показатели».

#### Краткое описание выполненной работы

На основе анализа лабораторных исследований и экспериментов на доменных печах № 6, 9, 10 ОАО «ММК» установлен механизм действия горячей прочности окатышей на технико-экономические показатели и выявлен рациональный режим их распределения на колошнике лотковым загрузочным устройством.

Загрузка окатышей в зону рудного гребня, то есть на расстояние  $2/3 - 3/4$  радиуса колошника, характеризующуюся пониженными температурами и повышенными рудными нагрузками, обеспечивала снижение потерь железа с выносимой из доменной печи пылью и шламом на 1 кг/т чугуна. Такое расположение, во-первых, снижает разрушение окатышей у поверхности слоя шихты в печи, во-вторых, переносит место разрушения в область шахты с большим сечением по сравнению с колошником.

Наиболее полное поступление окатышей в зону рудного гребня обеспечивает матрица загрузки, направляющая их из шихтового бункера в часть поперечного сечения колошника, соответствующую  $2/3 - 3/4$  его радиуса.

#### Полученный результат

Применительно к доменным печам № 2, 4, 6, 9 и 10 внедрена технология, снижающая разрушение окатышей у поверхности слоя шихты в колошниковое пространство, что уменьшает потери железа с выносимой пылью и шламом на 1 кг/т чугуна – в соответствии с техническим заданием.

Дата фактического внедрения: 1 декабря 2015г.

Срок полезного использования: без ограничения.

Начальник доменного цеха

А.А. Полинов

Научные руководители:

В.М. Колокольцев

С.К. Сибгатуллин

Ответственный исполнитель

А.С. Харченко

Согласовано:

Главный металлург

Д.В. Рабаджи

Главный специалист НТЦ

А.В. Колосов

(по аглококсодоменному производству)

Ответственный от доменного цеха

Д.И. Селезнев

Ответственный от НТЦ

С.Н. Пишнограев

*В.А. Колосов*

*С.Н. Пишнограев*



УТВЕРЖДАЮ  
Начальник НТЦ ОАО «ММК»  
Д.В. Куряев

18.03.2015

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

#### результатов работ по договору НИРиТР № 202279 от 04.09.2012 г

по теме: «Разработка и внедрение режима набора компонентов сырья в шихтовый бункер БЗУ для повышения равномерности поступления их в колошниковое пространство с целью повышения технико-экономических показателей доменных печей № 2,4,6».

#### Краткое описание выполненной работы

На основе экспериментального исследования на физической модели БЗУ и на доменных печах цеха разработан режим набора компонентов сырья в шихтовый бункер БЗУ для повышения равномерности поступления их в колошниковое пространство. Для управления расположением материалов создана математическая модель с диалоговыми окнами. Проведены опытные плавки с режимом загрузки, соответствующим рекомендациям математической модели. Разработанное программное обеспечение (ПО) набора компонентов сырья в шихтовый бункер БЗУ печей №№ 2, 4 и 6 внесено в компьютерную систему управления режимом загрузки печей доменного цеха. Представлен в патентный отдел комбината программный продукт для государственной регистрации.

Основной особенностью разработанного режима является установление очередности набора агломерата, окатышей и добавок, включающих до шести их видов, по рекомендации созданного программного обеспечения.

#### Полученный результат

На доменных печах № 2, 4 и 6 внедрен режим набора компонентов сырья в шихтовый бункер БЗУ с использованием результатов физического и математического моделирования продвижения их через шихтовый бункер, обеспечивший повышение производительности в соответствии с техническим заданием – на 15 т/сутки.

#### Способность к правовой охране полученного результата

Представлена в НТЦ комбината заявка для государственной регистрации разработанной программы в Реестре программ для ЭВМ.

Дата фактического внедрения: 4 марта 2015г.

Срок полезного использования: без ограничения.

Начальник доменного цеха  
Научные руководители

Ответственный исполнитель

Согласовано:

Главный металлург

Главный специалист НТЦ

(по аглококсодоменному производству)

Куратор договора

А.А. Полинов

В.М. Колокольцев

С.К. Сибгатуллин

А.С. Харченко

А.В. Чевычелов

А.В. Колосов

В.А. Бегинюк



#### Акт внедрения

результатов работ по договору № 201010 с ФГБОУ ВПО “МГТУ им. Г. И Носова” по теме: Выявление рационального дутьевого режима, обеспечивающего эквивалент замены кокса природным газом  $0,7 \text{ кг/м}^3$  при дополнительном увеличении расхода газа”

#### Краткое описание выполненной работы.

Установлены рациональные изменения режимов дутья и загрузки для увеличения расхода природного газа со снижением удельного расхода кокса. Выявлены два независимых направления дополнительного увеличения расхода газа:

- путём управляемой стабилизации соотношения расходов природного газа и дутья по фурмам;
- путём повышения равномерности окружного распределения загружаемых материалов по крупности, обеспечиваемая разработанной программой для ЭВМ и математической моделью.

На доменной печи № 10 проведены исследования и реализовано увеличение расхода природного газа на основе стабилизации соотношения его с расходом дутья по фурмам. Соотношение стабилизировали путем регулирования расхода газа по фактическому количеству дутья, поступающему через соответствующую фурму.

Проведением экспериментов на физической модели БЗУ и на доменных печах №№ 2,4,9,10 разработаны математическая модель и программа для ЭВМ, позволяющая повышать равномерность поступления компонентов сырья по крупности в колошниковое пространство для увеличения удельного расхода природного газа. Диалоговые окна обеспечивают управление режимом загрузки.

#### Полученный результат.

На доменной печи № 10 внедрена технология доменной плавки, обеспечившая увеличение расхода природного газа в соответствии с техническим заданием – на  $1 \text{ м}^3/\text{т}$  чугуна с эквивалентом замены им кокса  $0,7 \text{ кг/м}^3$ .

В качестве другого мероприятия, позволяющего увеличивать расход природного газа, доменному цеху представлена компьютерная программа повышения равномерности распределения сырьевых материалов по окружности печей.

#### Способность к правовой охране полученного результата.

Представлена в НТЦ комбината заявка для государственной регистрации разработанной программы в Реестре программ для ЭВМ.

Дата фактического внедрения: 30 сентября 2013г.

Срок полезного использования: без ограничения.

Начальник доменного цеха

А.А. Полинов

Научные руководители

В.М. Колокольцев

Согласовано:  
Главный металлург

С.К. Сибгатуллин

А.В. Чевычелов

Начальник ЦЛК

С.В. Денисов

Начальник ТУ

Е.В. Кебенко

“УТВЕРЖДАЮ”

Главный инженер ОАО “ММК”

С.Н. Ушаков

25.04.2012



### Акт внедрения

результатов исследований с участием ФГБОУ “МГТУ им. Г.И. Носова” по использованию коксового орешка и коксовой фракции в шихте доменных печей

Моделированием и проведением опытных плавов установили возможность использования кокса пониженной крупности в составе железорудной части шихты на доменных печах, имеющих различную определяющую зону по силовому взаимодействию потоков шихты и газа.

Выявили мероприятия, компенсирующие негативное действие коксового орешка и коксовой фракции на дренажную способность горна печи. К ним относятся:

- загрузка этих видов топлива-восстановителей в колошниковое пространство печи, оснащенной БЗУ лоткового типа, из середины объема шихтовых материалов в бункере БЗУ;
- использование скипового кокса повышенного качества ( $M_{10} < 9\%$ ;  $CSR > 57\%$ );
- использование промывочных материалов: Михайловской железной руды с расходом 2,9 кг на 1 кг кокса пониженной крупности; марганцевой руды с расходом 1,7 кг/кг.

Полученный результат: разработаны технологические параметры, позволяющие использовать коксовый орешек (10-25 мм) и коксовую фракцию (25-40 мм) с расходом до 20 кг/т чугуна и коэффициентом замены в интервале 0,68-0,91 кг/кг.

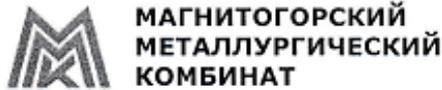
Социальный и научно-технический эффект – снижение удельного расхода кокса.

Начальник доменного цеха

А.В. Чевычелов

Зам. главного металлурга по агло-доменному производствам

И.В. Селютин



Публичное акционерное общество  
«Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК»)

Ул. Кирова, 93, г. Магнитогорск, Челябинская область, 455000  
Телефоны: приемная (3519) 24-74-16, факс 24-35-39, диспетчер 24-13-25

АКТ

13 ДЕК 2019

№ 27609/478

г. Магнитогорск

Испытаний программного продукта в рамках НИОКР  
№ 236011 от 09.07.18

Испытали разработанный программный продукт применительно к доменной печи № 2. Для повышения доли рудной части шихты на периферии и в осевой зоне с использованием программного продукта приняли решение изменить станции углового положения лотка при выгрузке железорудных материалов с позиций № 5 и 8 на позиции № 9 и 4 соответственно.

Полученные результаты представлены в таблице.

Таблица - Показатели работы доменной печи № 2 по периодам

Наименование показателей	Номера изменившихся станций углового положения лотка, с которых осуществлялась выгрузка ЖРС	
	5 и 8	9 и 4
Номер периода	I	II
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна	423,0	422,0
Производительность, т/сутки	2888	2916
Степень использования CO, %	43,4	43,8
Содержание кислорода в дутье, %	27,0	27,1

Из таблицы видно, что испытание программного продукта, произведенного для условий работы доменной печи № 2, обеспечило улучшение технико-экономических показателей плавки в соответствии с техническим заданием НИОКР: снижение удельного расхода кокса на 0,1 кг/т чугуна и повышение производительности печи на 10 т/сутки.

Начальник доменного цеха ПАО «ММК»

А.А. Полинов

Согласовано:

Главный специалист НТЦ

А.В. Колосов

Ведущий специалист НТЦ

И.Е. Прохоров

Профессор кафедры  
МиХТ ФГБОУ ВО «МГТУ»

С.К. Сибатуллин

Заведующий кафедрой  
МиХТ ФГБОУ ВО «МГТУ»

А.С. Харченко



*Handwritten signature*

*Handwritten signature*

*Handwritten signature: Селезнев Д.И.*



Публичное акционерное общество  
«Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК»)

Ул. Кирова, 93, г. Магнитогорск, Челябинская область, 455000  
Телефоны: приемная (3519) 24-74-16, факс 24-35-39, диспетчер 24-13-25

## АКТ

13 ДЕК 2018

№ 1209/146

г. Магнитогорск

Испытаний разработанных режимов загрузки на доменной печи № 6 в рамках НИОКР № 236011 от 09.07.18

Разработали и испытали на доменной печи № 6 ПАО «ММК» режим загрузки, обеспечивающий наиболее высокую равномерность распределения железорудных материалов по окружности колошника. Исследовали 4 периода.

В периоде I установили режим загрузки «вперемешку». В периоде II установили режим загрузки «добавки наверх». В скип шихтовые материалы загружали в следующей последовательности: в нижнюю часть скипа агломерат, коксовая фракция и кварцит, следом окатыши. В печь материалы попадали в обратном порядке. Таким образом, окатыши располагали в нижней части бункера БЗУ. В периоде III установили режим загрузки «добавки на дно скипа». В периоде IV установили разработанный режим загрузки, обеспечивающий следующее расположение компонентов шихты в бункере бесконусного загрузочного устройства: в нижней части бункера 25 % агломерата от его расхода, следом окатыши с добавочными материалами, после чего оставшиеся 75 % агломерата.

Полученные результаты представлены в таблице.

Таблица - Показатели работы доменной печи № 6 по периодам

Наименование показателей	Доля агломерата, располагающегося под окатышами в бункере БЗУ, %			
	-	0	100	25
Режим загрузки материалов в скип	вперемешку	добавки наверх	добавки на дно	25 % агломерата на дно
Номер периода	I	II	IV	III
Длительность периода, сутки	7	6	6	6
Показатель равномерности поступления железорудных материалов по ходу их выпуска из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи (при физическом моделировании)	0,70	0,30	0,62	0,79
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна	458,9	462,6	458,6	456,5
Производительность, т/сутки	3637	3584	3672	3693
Содержание кислорода в дутье, %	26,8	26,3	26,6	26,7
Расход дутья, м <sup>3</sup> /т чугуна	1189	1198	1171	1156
Градиент температуры газа на периферии по окружности под газоотводами, °С	50	60	53	42
Степень использования, %: CO	41,3	40,5	41,2	42,0
H <sub>2</sub>	42,2	43,4	42,5	44,7

Из таблицы видно, что из используемых в ПАО «ММК режимов загрузки компонентов сырья («вперемешку», «добавки наверх», «добавки на дно скипа»), наиболее высокую равномерность их распределения по окружности колошника давал режим «вперемешку». Разработанный режим загрузки, размещающий окатыши совместно с добавочными материалами в слое агломерата, увеличил показатель равномерности от 0,77 до 0,79. За счёт этого градиент температур на периферии по окружности под газоотводами уменьшился от 50 до 42 °С с улучшением результатов работы печи.

Использование рационального режима загрузки железорудных материалов в колошниковое пространство печи обеспечило выполнение технического задания: снижение удельного расхода кокса на 0,1 кг/т чугуна и увеличение производительности на 10 т/сутки.

Начальник доменного цеха ПАО «ММК»

Согласовано:  
Главный специалист НТЦ

Ведущий специалист НТЦ

Профессор кафедры  
МиХТ ФГБОУ ВО «МГТУ»

Заведующий кафедрой  
МиХТ ФГБОУ ВО «МГТУ»



А. Полинов

А.В. Колосов

И.Е. Прохоров

С.К. Сибгатуллин

А.С. Харченко

*Селезнев Л.В.*



Публичное акционерное общество  
«Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК»)

Ул. Кирова, 93, г. Магнитогорск, Челябинская область, 455000  
Телефоны: приемная (3519) 24-74-16, факс 24-35-39, диспетчер 24-13-25

## АКТ

13 ДЕК 2018

№ 8609/444

г. Магнитогорск

Испытаний разработанных режимов загрузки на доменной печи № 4 в рамках НИОКР № 236011 от 09.07.18

Разработали и испытали на доменной печи № 4 ПАО «ММК» режим загрузки, обеспечивающий наиболее высокую равномерность распределения железорудных материалов в колошниковом пространстве. Исследовали 2 периода.

В периоде I установили режим загрузки «вперемешку». В периоде II установили разработанный режим загрузки, обеспечивающий следующее расположение компонентов шихты в бункере бесконусного загрузочного устройства: в нижней части бункера 50 % агломерата от его расхода, следом окатыши с добавочными материалами, после чего оставшиеся 50 % агломерата.

Полученные результаты представлены в таблице.

Таблица - Показатели работы доменной печи № 4 по периодам

Наименование показателей	Доля агломерата, располагающегося под окатышами в бункере БЗУ, %	
	-	50
Режим загрузки добавочных материалов в скип	вперемешку	размещение окатышей и добавочных материалов в слое агломерата
Номер периода	I	II
Длительность периода, сутки	8	9
Показатель равномерности поступления железорудных материалов по ходу их выпуска из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи (при физическом моделировании)	0,70	0,75
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна	426,2	424,0
Удельный расход природного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна	129,9	123,6
Производительность, т/сутки	3505	3588
Содержание кислорода в дутье, %	26,0	25,9
Расход дутья, м <sup>3</sup> /т чугуна	1186	1172
Градиент температуры газа на периферии по окружности под газоотводами, °С	117	90
Степень использования CO, %	42,5	43,2

Из таблицы видно, что переход с режима загрузки «вперемешку» на режим, обеспечивающий размещение окатышей и добавочных материалов в слое

агломерата, сопровождалось повышением равномерности распределения компонентов шихты в колошниковом пространстве печи, на что указывает уменьшение градиента температур газа на периферии по окружности под газоотводами от 117 до 90 °С.

Повышением равномерности распределения компонентов шихты в периоде II по сравнению с периодом I увеличили степень использования СО от 42,5 до 43,2 % с улучшением показателей работы печи.

Использование рационального режима загрузки железорудных материалов в колошниковое пространство печи обеспечило выполнение технического задания: снижение удельного расхода кокса на 0,1 кг/т чугуна и увеличение производительности на 10 т/сутки.

Начальник доменного цеха ПАО «ММК»

Согласовано:  
Главный специалист НТЦ

Ведущий специалист НТЦ

Профессор кафедры  
МиХТ ФГБОУ ВО «МГТУ»

Заведующий кафедрой  
МиХТ ФГБОУ ВО «МГТУ»



А.А. Полинов

А.В. Колосов

И.Е. Прохоров

С.К. Сибгатуллин

А.С. Харченко

*Селезов В.И.*



**МАГНИТОГОРСКИЙ  
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ  
КОМБИНАТ**

Публичное акционерное общество  
«Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК»)

Ул. Кирова, 93, г. Магнитогорск, Челябинская область, 455000  
Телефоны: приемная (3519) 24-74-16, факс 24-35-39, диспетчер 24-13-25

**АКТ**

15 КОБ 2018 № 2009/458  
г. Магнитогорск

О проведении опытных плавов на доменной печи № 4 в рамках НИОКР № 236010 от 09.07.18, направленных на повышение эффективности использования природного газа при его расходе выше 120 м<sup>3</sup>/т чугуна

На доменной печи № 4 ПАО «ММК» провели промышленное опробование изменения расхода природного газа выше 120 м<sup>3</sup>/т чугуна в зависимости от изменения качества кокса и содержания кислорода в дутье. Исследовали 2 периода.

В периоде I удельный расход природного газа составлял 134,8 м<sup>3</sup>/т чугуна при содержании кислорода в дутье 26,0%. Горячая прочность кокса составляла 33,5%, при величине реакционной способности кокса, равной 42,6%. В периоде II по сравнению с периодом I уменьшили удельный расход природного газа от 134,8 до 124,5 м<sup>3</sup>/т чугуна при содержании кислорода в дутье 25,7%, горячей прочности кокса 35,5% и его реакционной способности по CRI 41,6%. Полученные результаты представлены в таблице.

Таблица - Показатели работы доменной печи № 4 по периодам

Наименование показателей	Удельный расход природного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна	
	134,8	124,5
Номер периода	I	II
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна:		
фактический	426,4	426,7
приведенный к условиям базового периода	426,4	423,3
Отношение удельных расходов кокса (K <sub>кп</sub> ) и природного газа (ПГ <sub>уд</sub> ), кг/м <sup>3</sup>	3,23	3,49
Производительность по количеству загруженных подач, т/сутки:		
фактическая	3495	3503
приведенная к условиям базового периода	3495	3548
Содержание кислорода, %	26,0	25,7
Отношение расходов природного газа и всего кислорода в дутье	0,43	0,41
Горячая прочность кокса по CSR, %	33,5	35,5
Реакционная способность CRI, %	42,6	41,6

Из таблицы видно, что рациональная величина расхода природного газа выше  $120 \text{ м}^3/\text{т}$  чугуна зависела от показателей качества кокса и обогащения дутья кислородом. Для уменьшения реакционной способности кокса с 42,6 до 41,6% и содержания кислорода в дутье с 26,0 до 25,7% рациональным был дутьевой режим, включающий снижение удельного расхода природного газа от  $134,8$  до  $124,5 \text{ м}^3/\text{т}$  чугуна. Такое регулирование удельного расхода природного газа обеспечило снижение удельного расхода кокса в соответствии с техническим заданием НИОКР – на  $0,1 \text{ кг/т}$  чугуна.

Начальник доменного цеха ПАО «ММК»



Согласовано:

Главный специалист НТЦ

Ведущий специалист НТЦ

Профессор кафедры  
ТМИЛП ФГБОУ ВО «МГТУ»

Доцент кафедры  
ТМИЛП ФГБОУ ВО «МГТУ»

*[Signature]*  
А.А. Полинов

*[Signature]*  
А.В. Колосов

*[Signature]*  
И.Е. Прохоров

*[Signature]*  
С.К. Сибгатуллин

*[Signature]*  
А.С. Харченко

*[Signature]*  
Александр Селезнев А.И.



Публичное акционерное общество  
«Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК»)

Ул. Кирова, 93, г. Магнитогорск, Челябинская область, 455000  
Телефоны: приемная (3519) 24-74-16, факс 24-35-39, диспетчер 24-13-25

## АКТ

15.11.2018 № ДЦ 09/457

г. Магнитогорск

О проведении опытных плавов на доменной печи № 6 в рамках НИОКР № 236010 от 09.07.18, направленных на повышение эффективности использования природного газа при его расходе выше 120 м<sup>3</sup>/т чугуна

Разработали и испытали на доменной печи № 6 ПАО «ММК» мероприятия, позволяющие увеличить расход природного газа выше 120 м<sup>3</sup>/т чугуна без дополнительного обогащения дутья кислородом. Исследовали 4 периода.

В периоде I удельный расход природного газа составлял 135,8 м<sup>3</sup>/т чугуна при содержании кислорода в дутье 27,6%. Горячая прочность кокса была равной 39,5% при величине реакционной способности 39,1%. В периоде II по сравнению с периодом I увеличилась горячая прочность кокса от 39,5 до 40,2% при уменьшении его реакционной способности от 39,1 до 37,8%. Для повышения эффективности доменной плавки сокращением удельного расхода кокса увеличили удельный расход природного газа от 135,8 до 143,9 м<sup>3</sup>/т чугуна. В результате получили экономию кокса с увеличением отношения расходов природного газа и кислорода от 0,42 до 0,45.

В периоде III удельный расход природного газа составлял 135,7 м<sup>3</sup>/т чугуна в условиях использования кокса с горячей прочностью 35,5 % и реакционной способностью 41,4 %. Отношение расходов природного газа и всего кислорода в дутье составляло 0,41. В периоде IV сократили удельный расхода кокса в соответствии с увеличением его показателя CSR до 36%, а CRI до 44,6%, понизив удельный расход природного газа от 135,7 до 120,7 м<sup>3</sup>/т чугуна. Отношение расходов природного газа и кислорода составило 0,38.

Полученные результаты представлены в таблице.

Таблица - Показатели работы доменной печи № 6 по периодам

Наименование показателей	Удельный расход природного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна			
	135,8	143,9	135,7	120,7
Номер периода	I	II	III	IV
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна:				
фактический	437,5	435,9	441,9	436,0
приведенный к условиям базового периода	-	435,9	-	438,7
Отношение удельных расходов кокса ( $K_{удп}$ ) и природного газа ( $ПГ_{уд}$ ), кг/м <sup>3</sup>	3,30	3,13	3,35	3,72
Производительность по количеству загруженных подач, т/сутки:				
фактическая	3512	3471	3375	3480
приведенная к условиям базового периода	-	3471	-	3412
Содержание кислорода, %	27,6	27,0	27,1	27,0
Отношение расходов природного газа и технологического кислорода	0,42	0,45	0,41	0,38
Горячая прочность кокса по CSR, %	39,5	40,2	35,5	36,0
Реакционная способность CRI, %	39,1	37,8	41,4	44,6

Из таблицы видно, что рациональный дутьевой режим, включающий отношение расходов природного газа и кислорода, зависел от показателей качества кокса по CSR и CRI. При горячей прочности кокса более 39% повышением отношения расходов природного газа и кислорода от 0,42 до 0,45 в периоде II по сравнению с периодом I получили уменьшение удельного расхода кокса. Для этого увеличили удельный расход природного газа от 135,8 до 143,9 м<sup>3</sup>/т чугуна.

В условиях работы доменной печи № 6 на коксе с горячей прочностью менее 36 % рациональной составляющей дутьевого режима стало уменьшение отношения удельных расходов природного газа и кислорода от 0,41 до 0,38 путем уменьшения удельного расхода природного газа от 135,7 до 120,7 м<sup>3</sup>/т чугуна. Это дало снижение удельного расхода кокса.

Таким образом, управление дутьевым режимом в условиях высокого расхода природного газа обеспечило снижение удельного расхода кокса в соответствии с техническим заданием НИОКР – на 0,1 кг/т чугуна.

Начальник доменного цеха ПАО «ММК»



А.А. Полинов

Согласовано:  
Главный специалист НТЦ

А.В. Колосов

Ведущий специалист НТЦ

И.Е. Прохоров

Профессор кафедры  
ТМилП ФГБОУ ВО «МГТУ»

С.К. Сибегатуллин

Доцент кафедры  
ТМилП ФГБОУ ВО «МГТУ»

А.С. Харченко

*Владимир Селезнев Д.И.*



**ПРОЕКТ ИЗМЕНЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ ИНСТРУКЦИЮ  
ТИ 101-Д-22-2014**

**по результатам работы по договору НИРиТР № 236011 от 09.07.2018 г.**

Тема: «Разработка и внедрение системы загрузки доменных печей, оборудованных БЗУ, позволяющей оптимизировать их работу при изменении газодинамических и сырьевых условий».

**Пункт 5.2.16 изложить в следующей редакции:**

Уровень засыпи, масса железорудной порции, матрица загрузки, последовательность набора компонентов шихты в скип устанавливаются заместителем начальника цеха по технологии по согласованию с начальником цеха.

От очередности набора компонентов шихты в скип зависит последовательность поступления их в бункер БЗУ и распределение шихты в колошниковом пространстве печи по окружности и радиусу:

- максимальному поступлению окатышей в пристеночную зону колошника соответствует загрузка их в нижнюю часть бункера БЗУ, открытие затвора бункера для выгрузки материалов в колошниковое пространство при вращении лотка по окружности с изменением углового положения лотка от периферии к центру;

- максимальному поступлению окатышей в зону рудного гребня соответствует загрузка их в шихтовый бункер БЗУ после агломерата, открытие затвора бункера для выгрузки материалов в колошниковое пространство при вращении лотка по окружности с одновременным изменением его углового положения от периферии до позиции, соответствующей 2/3 радиуса колошника;

- смещение окатышей к осевой зоне обеспечивает загрузка их в шихтовый бункер БЗУ после агломерата, открытие затвора бункера для выгрузки материалов в колошниковое пространство при вращении лотка по окружности с одновременным изменением его углового положения от позиции, соответствующей 2/3 радиуса колошника, до осевой зоны;

- наиболее однородную смесь по крупности и составу обеспечивает следующая последовательность загрузки компонентов шихты в бункер БЗУ: на дно шихтового бункера 25-35 % агломерата, затем окатышей с добавочными материалами, далее загрузка оставшегося 75-65 % агломерата.

При выборе очередности набора компонентов шихты в скип учитывают техническое состояние футеровки доменной печи, расход и состав железорудных материалов:

- при необходимости удаления лишнего слоя гарнисажа, окатыши загружают в нижнюю часть бункера БЗУ; таким режимом обеспечивают поступление их в пристеночную зону колошника, что при эксплуатации печи позволяет ликвидировать лишний слой гарнисажа воздействием на него окатышами и улучшить газопроницаемость шихты в пристеночной зоне.

- при работе доменной печи с повышенной долей окатышей, превышающей 40-45%, для сохранения целостности футеровки шахты, распара и заплечиков их загружают в бункер БЗУ после агломерата наверх.

- для защиты горна печи гарнисажем материал, формирующий его, располагают в нижней части бункера БЗУ. Изменением углового положения лотка от периферии до позиции, соответствующей 2/3 радиуса колошника, размещают его в пристеночной зоне печи.

## Лист согласования

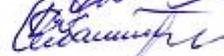
на проект изменения в технологическую инструкцию по результатам работы по договору № 236011 от 09.07.2018 с ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

по теме: «Разработка и внедрение системы загрузки доменных печей, оборудованных БЗУ, позволяющей оптимизировать их работу при изменении газодинамических и сырьевых условий».

Начальник доменного цеха

 А.А. Полинов

Научные руководители:

 С.К. Сибэгатуллин

 А.С. Харченко

СОГЛАСОВАНО:

 Д.В. Рабаджи

Главный металлург

Главный специалист НТЦ  
(по аглококсодоменному производству)

 А.В. Колосов

Ответственный от доменного цеха

 Д.И. Селезнев

 Г. Грищенко



УТВЕРЖДАЮ

Начальник НТЦ ПАО «ММК»

А.Д. Картунов

«7» 10 2019 г.

**ПРОЕКТ ИЗМЕНЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ ИНСТРУКЦИЮ  
ТИ 101-Д-22-2019**

**по результатам работы по договору НИРиТР № 236010 от 09.07.2018 г.**

Тема: «Анализ и выявление закономерностей работы с определением критериев оценки работы доменных печей ПАО «ММК» при удельном расходе природного газа выше 120 м<sup>3</sup>/т чугуна».

**Ввести дополнение в пункт 6.19.**

**Текст дополнения:**

6.19.1. В условиях работы доменных печей с расходом природного газа более 120 м<sup>3</sup>/т чугуна дополнительно учитывают реакционную способность кокса CRI и отношение расхода природного газа (ПГ) ко всему поступающему в зону горения кислорода (O<sub>2</sub>)<sub>сум.</sub> Величину (O<sub>2</sub>)<sub>сум</sub> вычисляют по его содержанию в дутье (% O<sub>2</sub>, п.6.15) и расходу дутья (V<sub>д</sub>, п.6.15):

$$(O_2)_{\text{сумм}} = V_{\text{д}} \times (\% O_2 / 100).$$

6.19.2. Рациональное соотношение расходов природного газа и всего поступающего в зону горения доменной печи кислорода, обеспечивающее наиболее эффективное использование природного газа, составляет:

- 0,30-0,33 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> при величине показателя CRI 30-33%;
- 0,33-0,40 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> при величине показателя CRI 33-35%;
- 0,40-0,44 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> при величине показателя CRI 35-40% и более.

Дальнейшее увеличение соотношения расходов природного газа и кислорода более 0,44 приведет к уменьшению теоретической температуры горения за допустимые пределы по пункту 5.3.31.

Начальник доменного цеха

А.А. Полинов

Научные руководители:

С.К. Сибгатуллин

А.С. Харченко

СОГЛАСОВАНО:

И.о. главного металлурга

И.Ф. Искаков

Главный специалист НТЦ  
(по аглококсодоменному производству)

А.В. Колосов

Ответственный от доменного цеха

Д.И. Селезнев



**ПРОЕКТ ИЗМЕНЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ ИНСТРУКЦИЮ  
 ТИ 101-Д-22-2014**

по результатам работы по договору НИРиТР № 234081 от 28.12.2017 г.  
 Тема: «Разработка рациональной технологии загрузки промывочных материалов в доменные печи ПАО «ММК», оснащенные БЗУ лоткового типа».

**Ввести дополнение в пункт 7.5.5. после подпункта:**

«загружать в печь промывочные шихты с трудновосстановимыми материалами или разжижающими шлак добавками; количество и состав промывочных шихт устанавливается начальником цеха...».

**Текст дополнения:**

После выявления загромождения горна по признакам п. 7.5.3 технологической инструкции необходимо обеспечить рациональную технологию загрузки промывочных материалов в колошниковое пространство печи, которая включает учет горячей прочности кокса.

При величине показателя CSR более 40 % направлять эти материалы в зону рудного гребня.

При величине показателя CSR менее 40 % целесообразно загружать промывочные материалы в зависимости от стабильности качества кокса:

- к осевой зоне, соответствующей станциям углового положения лотка БЗУ №№2-5, на коксе с горячей прочностью менее 90% от средней величины за предшествующие 5 суток;

- в зону рудного гребня при величине горячей прочности более 110% от средней величины;

- равномерно по сечению колошника в интервале горячей прочности от 90 до 110 % от средней величины.

Начальник доменного цеха

А.А. Полинов

Научные руководители:

С.К. Сибгатуллин

СОГЛАСОВАНО:

А.С. Харченко

Главный металлург

Д.В. Рабаджи

Главный специалист НТЦ  
 (по аглококсодоменному производству)

А.В. Колосов

Ответственный от доменного цеха

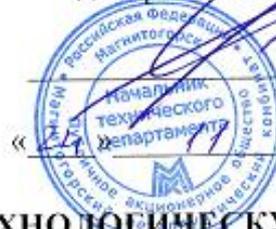
Д.И. Селезнев

*15.11.18 / Бегичюк В.А.*

УТВЕРЖДАЮ  
Начальник технического  
департамента ЦАО «ММК»

А.А. Мухин

2017 г.



### ПРОЕКТ ДОПОЛНЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ ИНСТРУКЦИЮ ТИ 101-Д-22-2014

по результатам выполнения договора НИОКР № 231624 от 10.04.2017 г.  
Тема: «Разработка оптимального шлакового режима для доменных печей в условиях существующей и перспективной сырьевой базы».

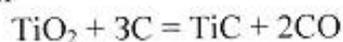
#### Ввести дополнительный пункт 7.9.

7.9 Повышенные тепловые нагрузки на систему охлаждения горна

7.9.1 Повышенные тепловые нагрузки свидетельствуют об износе футеровки, требующем формирования гарнисажа.

Для формирования гарнисажа применяют материалы, содержащие оксиды титана. Формирование гарнисажа при этом достигается за счёт образования карбидов и карбонитридов титана. Температура начала восстановления  $TiO_2$  последовательно повышается по мере снижения окисленности его с  $950 - 1100^{\circ}C$  до  $1300^{\circ}C$ .

Термодинамические условия в присутствии углерода оказываются наиболее благоприятными для протекания реакций карбидообразования по суммарной реакции



Она протекает через образование ряда промежуточных оксидов, которые образуют непрерывный ряд твердых растворов с карбидом титана. Повышение температуры сдвигает равновесие системы  $Ti - TiC_xO_y - C - CO$  в сторону замещения кислорода углеродом. Участие в этом процессе углерода углеродистой футеровки горна приводит к химической связи оксикарбидов титана в виде гарнисажа с огнеупорной кладкой печи. В присутствии азота образуются карбонитриды титана. Гарнисаж на основе карбонитридов титана имеет температуру плавления более  $3000^{\circ}C$ .

7.9.2 К формированию гарнисажа приступают по указанию заместителя начальника доменного цеха по технологии.

7.9.3 Расход материала, формирующего гарнисаж, устанавливают в пределах  $20 - 30$  кг/т чугуна. На доменных печах № 2, 4, 6, 9 и 10, оснащённых лотковым БЗУ, его загружают в шихтовый бункер БЗУ первым, затем другие сырьевые материалы. Открывают шихтовый затвор для выгрузки на станциях лотка № 11-9 при вращении его по окружности с одновременным изменением его углового положения.

7.9.4 Загрузку материалов в режиме формирования гарнисажа продолжают до уменьшения тепловых нагрузок на холодильники до рационального уровня – в интервале 2,5-4,5 ккал/(м<sup>2</sup>·час).

7.9.5 На доменных печах № 1, 7, 8, оснащённых конусным загрузочным устройством, материал, формирующий гарнисаж, загружают в качестве добавки в верхнюю часть первого рудного скипа системы загрузки.

**Ввести дополнительный пункт 5.5.4.**

5.5.4. При корректировке содержания MgO в доменном шлаке использованием конвертерного шлака применяют специальные режимы загрузки его в среду неофлюсованных окатышей путем размещения шлака в скипе под окатышами и над ними. Кластер «шлак-окатыши» располагают между слоями агломерата: 75 % агломерата под кластером, 25 % над ним. Расход конвертерного шлака устанавливают, исходя из достижения заданного содержания MgO в доменном шлаке.

Начальник доменного цеха

А.А. Полинов

Научные руководители:

С.К. Сибгатуллин

СОГЛАСОВАНО:

А.С. Харченко

Главный металлург

Д.В. Рабаджи

Главный специалист НТЦ  
(по аглококсодоменному производству)

А.В. Колосов

Ответственный от доменного цеха

Д.И. Селезнев

И.В. Семенов

= Грищенко

УТВЕРЖДАЮ  
 Начальник НТЦ ОАО «ММК»  
 Д.В. Куряев  
 « 20 » 11. 2015 г.



**ПРОЕКТ ИЗМЕНЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ ИНСТРУКЦИЮ  
 ТИ 101-Д-22-2014**

**по результатам работы по договору НИРиТР № 224586 от 31.03.2015 г.**

по теме: «Разработка и освоение рациональных режимов работы доменных печей ОАО «ММК», оборудованных БЗУ, при различной доле окатышей в составе шихты».

Внести дополнение в пункт 5.2.15.

Загрузка шихтовых материалов должна обеспечивать стабильную величину тепловых нагрузок на систему охлаждения шахты, распара и заплечиков печи. При повышении доли неофлюсованных окатышей увеличивается риск обдиранья гарнисажа и футеровки печи. Рост их доли на 1% в интервале 30-60 % сопровождается повышением температуры холодильников шахты, распара и заплечиков в среднем на 1,1 °С. Длительная работа печи (3-6 мес.) на повышенной доле окатышей будет способствовать выходу из строя холодильников, незапланированным простоям печи и преждевременному выходу ее из строя. Для предотвращения ускоренного износа футеровки печи при доле окатышей более 37% на доменных печах, оснащенных БЗУ лоткового типа, целесообразно исключить попадание части окатышей в пристеночную область исходя из вышеуказанного соотношения роста средних температур холодильников шахты, распара и заплечиков: уменьшение содержания окатышей на 0,91% обеспечивает снижение температуры холодильников на 1 °С. Смещению окатышей от пристеночной области способствует использование режима загрузки «добавки на дно скипа».

В случае если средняя температура холодильников шахты, распара и заплечиков будут увеличиваться и достигать критических величин, равных 50-60 °С, то предварительно согласовав с начальником цеха, необходимо дополнительно уменьшать содержание окатышей в рудных скипах, поступающих в периферийную зону печи и увеличивать ее в рудных скипах, выгрузка которых производится в зоне рудного гребня. При этом долю окатышей необходимо изменять не более чем на 5%.

Начальник доменного цеха

А.А. Полинов

Научные руководители:

В.М. Колокольников

С.К. Сибгатуллин

Ответственный исполнитель

А.С. Харченко

СОГЛАСОВАНО:

Главный металлург

Д.В. Рабаджи

Главный специалист НТЦ

А.В. Колосов

(по аглококсодоменному производству)

Ответственный от доменного цеха

Д.И. Селезнев

Ответственный от НТЦ

С.Н. Пишнограев

















**ПРОЕКТ ИЗМЕНЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ ИНСТРУКЦИЮ  
ТИ 101-Д-22-2014**

**по результатам работы по договору НИРиТР № 225255 от 11.06.2015 г.  
по теме: «Влияние горячей прочности окатышей разных производителей на ход доменной  
плавки и технико-экономические показатели».**

Два первых абзаца в п. 2.7 заменить следующим:

Персонал лаборатории технологического контроля НТЦ ежедневно опробует все поступающие железорудные материалы. Контроль качества всех поступающих в цех железорудных шихтовых материалов осуществляется лабораторией технологического контроля НТЦ.

Ежедневно по агломерату и окатышам контролируются: химический состав, содержание фракции 0 – 5 и 5 – 10 мм, прочностные характеристики (сопротивление удару и истиранию агломерата и окатышей) – ГОСТ 15137-77 и предел прочности при сжатии окатышей – ГОСТ 24765-81. Ежемесячно осуществляется контроль горячей прочности окатышей согласно ИСО 13930:2007 по показателю LTD<sub>+6,3</sub>. Рассев агломерата по фракциям производится персоналом лаборатории технологического контроля НТЦ.

Ввести дополнение в пункт 5.2.15.

Загрузка шихтовых материалов должна решать задачу достижения стабильно низкой величины потерь железа с колошниковой пылью и сырьевыми материалами, переходящими в шлам. Величина потерь железа растет с ухудшением качества железорудных материалов по крупности и прочности. Снижение горячей прочности окатышей по показателю LTD<sub>+6,3</sub> на 1% сопровождается ростом потери железа с выносимой колошниковой пылью и шламом на 0,27 кг/т чугуна.

В направлении снижения этих потерь действует загрузка окатышей в зону рудного гребня, то есть на расстоянии 2/3 - 3/4 радиуса колошника, характеризующуюся пониженными температурами и повышенными рудным нагрузкам. Такое расположение окатышей, во-первых, снижает их разрушение у поверхности слоя шихты, во-вторых, переносит место разрушения в область шахты с большим сечением по сравнению с колошником. Применение такого режима при работе печи на окатышах, имеющих постоянную горячую прочность по показателю LTD<sub>+6,3</sub>, обеспечит снижение потерь железа с выносимой пылью и шламом на 1 кг/т чугуна.

Начальник доменного цеха

А.А. Полинов

Научные руководители:

В.М. Колокольников

Ответственный исполнитель

С.К. Сибатуллин

А.С. Харченко

Согласовано:

Главный металлург

Д.В. Рабаджи

Главный специалист НТЦ

А.В. Колосов

(по аглококсодоменному производству)

Ответственный от доменного цеха

Д.И. Селезнев

Ответственный от НТЦ

С.Н. Пишногрэв

*В.А. Полюхин*

*С.Н. Пишногрэв*  
*Т.И. Селезнев*



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

О.Л. Назарова

«10» 09 2019 г.

**АКТ**

об использовании в учебном процессе

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова»

результатов диссертационной работы Харченко Александра Сергеевича

Материалы диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук Харченко Александра Сергеевича внедрены в учебный процесс на основании рекомендации методической комиссии института металлургии, машиностроения и материалобработки.

Материалы диссертационного исследования используются в образовательном процессе при подготовке бакалавров по направлению 22.03.02 «Металлургия», профиль подготовки «Металлургия черных металлов», магистров по направлению 22.04.02 «Металлургия», профиль подготовки «Металлургия черных металлов», кадров высшей квалификации по направлению 22.06.01 «Технологии материалов».

Результаты исследований используются при чтении лекций и проведении практических занятий по следующим дисциплинам: теория, технология и автоматизация доменного процесса, теория процессов производства чугуна, основы металлургического производства, научно-исследовательская работа, моделирование процессов и объектов в металлургии, основы технического творчества.

Результаты диссертационного исследования отражены в следующих учебных и методических изданиях:

- Практикум по дисциплине «Теория процессов производства чугуна» для интерактивной технологии очного образования / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. 143 с;

- Рациональное использование металлургического кокса в доменной плавке: учебное пособие / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. 162 с;

- Металлургические свойства железорудного сырья: учебное пособие / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. 150 с;

- Распределение шихтовых материалов бесконусным загрузочным устройством лоткового типа: методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Теория, технология и автоматизация доменного процесса» / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 25 с;

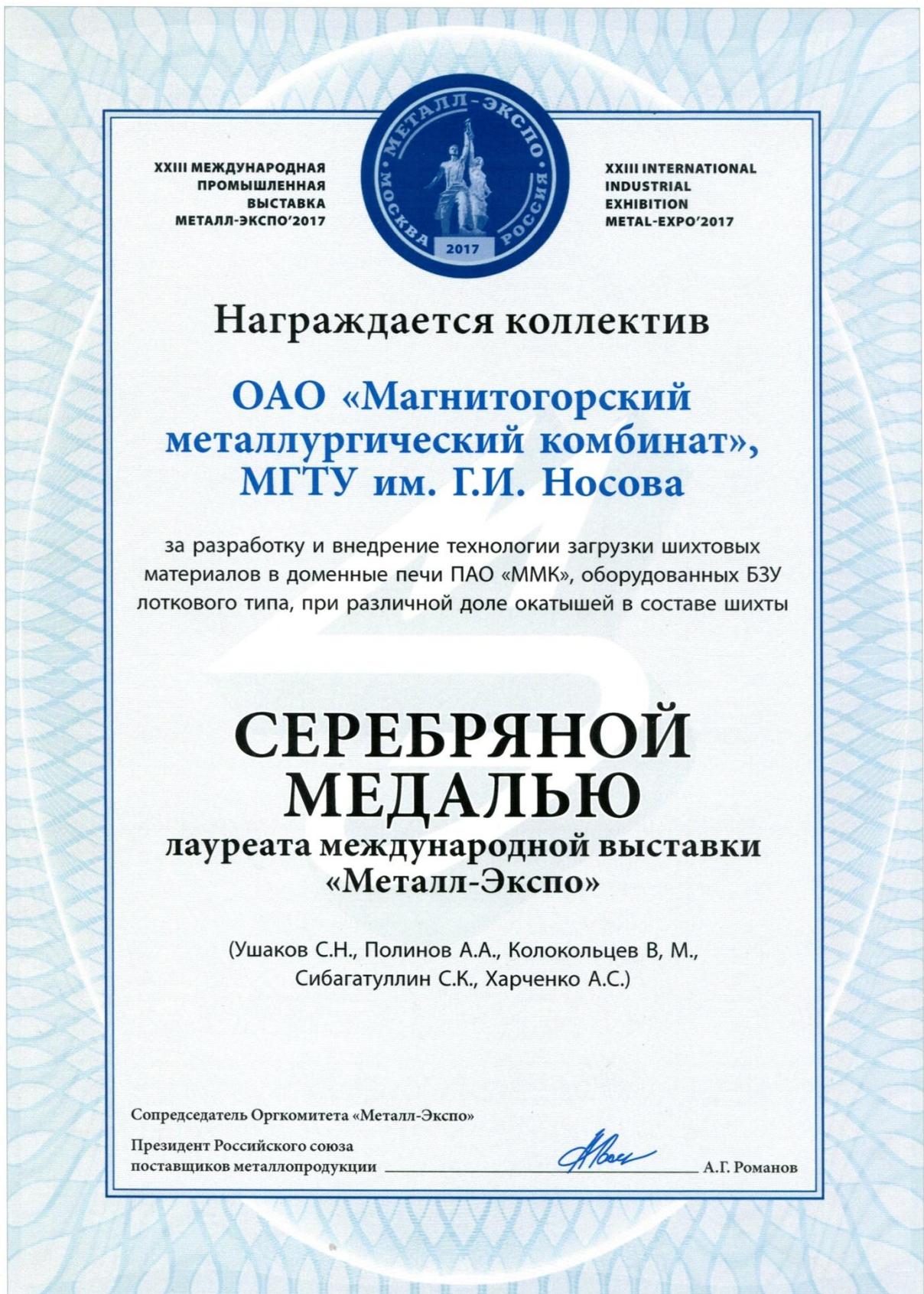
- Анализ факторов, влияющих на равномерность состава шихты на колошнике доменной печи: методические указания к курсовой работе по дисциплине «Моделирование процессов и объектов в металлургии» С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 20 с;

- Анализ дренажной способности горна доменной печи: методические указания к курсовой работе по дисциплине «Моделирование процессов и объектов в металлургии» С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 16 с.

Внедрение результатов диссертационной работы Харченко А.С. в учебный процесс позволяет расширить и углубить знания обучающихся в теории и технологии производства чугуна в доменных печах.

Председатель методической комиссии  
института металлургии, машиностроения  
и материалообработки,  
заведующий кафедрой механики  
д-р техн. наук, доцент

 А.С. Савинов



## Расчет экономического эффекта от мероприятия

"Разработка и внедрение режима набора компонентов сырья в шихтовый бункер БЗУ для повышения равномерности поступления их в колошниковое пространство с целью повышения технико-экономических показателей доменных печей №2, 4, 6."

(не является основанием для выплаты материального вознаграждения)

Код идеи	ДЦ	С	№	Категория	Себестоимость
Цех	Доменный цех			Название мероприятия	
Участок	ДП № 2, 4, 6			Разработка и внедрение режима набора компонентов сырья в шихтовый бункер БЗУ для повышения равномерности поступления их в колошниковое пространство с целью повышения технико-экономических показателей ДП №2, 4, 6	
Инициатор	А.А. Полинов				
Должность инициатора	Начальник цеха				
Телефон	25-45-88				
e-mail	polinov.aa@mmk.ru				
Дата	07.05.2018				

Описание проблемы	Предлагаемое решение
Недостаточно высокие показатели производства печей	Повышение производительности доменных печей № 2,4,6

Наименование	Ключевые технические и экономические показатели			
	ед. изм.	Значение		
		до (2017)	после (2017)	Δ
Среднее номинальное время работы за год по ДП № 2, 4, 6	°С		359,34	
Суммарная производительность по ДП № 2, 4, 6	т/сут	9 962,17	9 977,17	15,00
Стоимость покупного лома	руб/т		14 212,10	
Стоимость чугуна по переменным на покупном сырье	руб/т		13 481,63	
Изменение прибыли за счет увеличения объемов производства	млн.руб.			3,9
Всего изменение прибыли	млн.руб.			3,94
Затраты на внедрение	млн.руб.			0
Доля влияния	%			15
Эффект от НИОКР	млн.руб.			0,6
Срок реализации (получение обор. СМР, пуско-наладка)				
Капитальные затраты на реализацию				
Простой срок окупаемости	года			0,0
IRR				
NPV				

## Визирование чистовика предложения

Начальник ДЦ  
И.о. вед. специалиста ТГ ДЦ  
Ведущий экономист  
И.о. ст. менеджера ГЭМП УЭ

## Подпись

## ФИО

А.А. Полинов  
В.В. Недашковский  
В.А. Журавлев  
П.В. Вонжулова



**Расчет экономического эффекта от мероприятия**

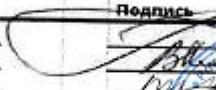
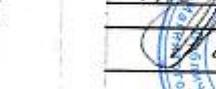
**"Влияние горячей прочности окатышей разных производителей на ход доменной плавки и технико-экономические показатели"**  
(не является основанием для выплаты материального вознаграждения)

Код идеи	ДЦ	С	№
Цех	Доменный цех		
Участок	Доменный цех		
Инициатор	А.А. Полинов		
Должность инициатора	Начальник цеха		
Телефон	25-45-88		
e-mail	polinov.aa@mmk.ru		
Дата	07.05.2018		

Категория	Себестоимость
Название мероприятия	
Влияние горячей прочности окатышей разных производителей на ход доменной плавки и технико-экономические показатели	

Описание проблемы	Предлагаемое решение
Высокий выход колошниковой пыли	Внедрение технологии, снижающей разрушение окатышей у поверхности слоя шихты в колошниковое пространство, что уменьшает потери железа и снижает его расход

Ключевые технические и экономические показатели				
Наименование	Значение			
	ед. изм.	до (2015)	после (2017)	Δ
Производство чугуна в год по цеху	млн.тонн		10 163,289	
Расход железа	кг/т чугуна	964,04	963,94	0,10
Изменение удельного расхода кокса	кг/т чугуна	431,70	431,60	0,10
Стоимость 1 тонны железа	руб/т		7 168,57	
Цена кокса по переменно	руб/т		11 392,31	
Изменение прибыли за счет изменения расхода железа	млн.руб.			7,3
Изменение прибыли за счет изменения расхода кокса	млн.руб.			11,6
<b>Всего изменение прибыли</b>	млн.руб.			<b>18,86</b>
Доля влияния	%			5,0
Эффект от НИОКР	млн.руб.			0,9
Срок реализации (получение обор. СМР, пуско-наладка)				
Капитальные затраты на реализацию				
Простой срок окупаемости	года			0,3
IRR				
NPV				

Визирование чистовика предложения	Подпись	Ф.И.О.
Начальник ДЦ		А.А. Полинов
И.о. вед. специалиста ТГ ДЦ		В.В. Недашковский
Ведущий экономист		В.А. Журавлев
И.о. ст. менеджера ГЭМП УЭ		П.В. Вонжулова



Копия НИОКР 225255

## Расчет экономического эффекта от мероприятия

"Разработка и освоение рациональных режимов работы доменных печей ОАО "ММК", оборудованных БЗУ, при различной доле окатышей в составе шихты"  
(не является основанием для выплаты материального вознаграждения)

Код идеи	ДЦ	С	№	Категория	Себестоимость
Цех	Доменный цех			Название мероприятия	
Участок	ДП № 2, 4, 6, 9, 10			Разработка и освоение рациональных режимов работы доменных печей ОАО "ММК", оборудованных БЗУ, при различной доле окатышей в составе шихты	
Инициатор	А.А. Полинов				
Должность инициатора	Начальник цеха				
Телефон	25-45-88				
e-mail	polinov.aa@mmk.ru				
Дата	07.05.2018				

**Описание проблемы**

Несовременное изменение технологических параметров при изменении технологии плавки чугуна

**Предлагаемое решение**

Разработаны рациональные режимы печей, обеспечивающие отдаление части окатышей от футеровки, что снижает тепловые нагрузки на систему охлаждения шахты, распара и запечников печей.

Наименование	Ключевые технические и экономические показатели			
	ед. изм.	до (2015)	после (2017)	Δ
Производство чугуна в год по ДП № 2, 4, 6, 9, 10	млн. тонн		8 147,530	
Изменение удельного расхода кокса	кг/т чугуна	433,79	433,69	0,10
Цена кокса по переменным	руб/т		11 392,31	
Изменение прибыли за счет изменения расхода кокса	млн.руб.			9,3
Всего изменение прибыли	млн.руб.			9,28
Затраты на внедрение	млн.руб.			0
Доля влияния	%			10
Эффект от НИОКР	млн.руб.			0,9
Срок реализации (получение сбор. СМР, пуско-наладка)				
Капитальные затраты на реализацию				
Простой срок окупаемости	года			0,0
IRR				
NPV				

## Визирование чистовика предложения

Начальник ДЦ \_\_\_\_\_  
И.о. вед. специалиста ТГ ДЦ \_\_\_\_\_  
Ведущий экономист \_\_\_\_\_  
И.о. ст. менеджера ГЭМП УЭ \_\_\_\_\_

## Подпись

А.А. Полинов  
В.В. Федашковский  
В.А. Журавлев  
П.В. Вонжулова



## Расчет

1. Экономия за счет снижения удельного расхода кокса:  
 $((461,2 - 455,7)/1000 \cdot 8684494 \cdot 6900,42)/1000000 = 328,4$  млн. руб.
2. Экономия за счет повышения производительности печи  
 $((8684494 - 8541432) \cdot 288,01)/1000000 = 41,2$  млн. руб.
3. Экономия от реализации доменного газа  
 $((904 - 871,4) \cdot 8684494 \cdot 12,27/1000)/1000000 = 3,47$  млн. руб.
4. Экономия от снижения расхода дутья  
 $((1392,5 - 1370,6) \cdot 8684494 \cdot 100,56/1000)/1000000 = 19,13$  млн. руб.
5. Затраты на использование коксового орешка  
 $((3,1 - 1,4)/1000 \cdot 8684494 \cdot 6101,17)/1000000 = 89,55$  млн. руб.
6. Затраты на использование промывочных материалов  
 $(4,4/1000 \cdot 1143,91 + 8,3/1000 \cdot 1137,31) \cdot 8684494 = 125,69$  млн. руб.

Доля МГТУ в экономическом эффекте составила

$$(328,4 + 41,2 + 3,47 + 19,13 - 89,55 - 125,69) \cdot 0,02 = 3,54 \text{ млн. руб.}$$

Ведущий специалист по ДП ГЭМП

Журавлев В.А.

Начальник доменного цеха

Чевычелов А.В.



## РАСЧЕТ

экономического эффекта от внедрения на доменной печи №10 ОАО «ММК» результатов НИРиТР № 201010 от 28.03.2012 «Выявление рационального дутьевого режима, обеспечивающего эквивалент замены кокса природным газом 0,7 кг/м<sup>3</sup> при дополнительном увеличении расхода газа» (данный расчет не является основанием для выплаты вознаграждения)

На доменной печи № 10 30.09.13 г. внедрена технология доменной плавки, обеспечивающая снижение удельного расхода кокса увеличением расхода природного газа за счет двух независимых направлений:

- управление стабилизацией соотношения расходов природного газа и дутья по фурмам;
- повышение равномерности окружного распределения загружаемых материалов по крупности, обеспечиваемая разработанной программой для ЭВМ и математической моделью.

Расчет экономического эффекта выполнен в соответствии с «Инструкцией по определению экономической эффективности использования в черной металлургии новой техники, изобретений и рационализаторских предложений».

### Исходные данные

1. Показатели работы доменной печи № 10 в базовом и опытном периоде

Показатели	Период	
	1.10.12-30.09.13	1.10.13-30.09.14
Удельный расход: кокса, кг/т чугуна	441,3	430,5
природного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна	74,1	94,8
Потери от измельчения сухого кокса, кг/т чугуна	41,7	33,7

2. Производительность доменной печи в опытном периоде.....1 746073 тонн

3. Цена сырьевых материалов в опытном периоде:

кокса сухого скипового.....5689,98 р/тонну

природного газа.....	3488,47 р /1000 м <sup>3</sup>
потери от измельчения сухого кокса.....	2595,15 р/тонну
4. Затраты на выполнение НИРиТР.....	2,2 млн. р
5. Коэффициент, учитывающий действие НИРиТР.....	0,3

#### Расчет

1. Экономия за счет снижения удельного расхода кокса:

$$(441,3 - 430,5) \cdot 1746073 \cdot 5689,98 = 107,3 \text{ млн. руб.}$$

2. Экономия за счет снижения потерь от измельчения кокса:

$$(41,7 - 33,7) \cdot 1746073 \cdot 2595,15 = 36,25 \text{ млн. руб.}$$

3. Затраты на увеличение расхода природного газа:

$$(94,8 - 74,1) \cdot 1746073 \cdot 3488,47 = 126,09 \text{ млн. руб.}$$

4. Экономический эффект составляет:

$$(107,3 + 36,25 - 126,09) \cdot 0,3 = 5,23 \text{ млн. руб.}$$

Начальник доменного цеха

А.А. Полинов

Ответственный от доменного цеха

В.А. Бегинюк

Ведущий экономист ГЭМП УЭ

В.А. Журавлев

Научные руководители

В.М. Колокольцев

Ответственный исполнитель

С.К. Сибгатуллин  
А.С. Харченко